

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
PROGRAMA DE PÓS – GRADUAÇÃO  
EM ENGENHARIA DE MATERIAIS**

**FABRICAÇÃO RÁPIDA DIRETA E INDIRETA DE PEÇAS MINIATURIZADAS POR  
ESTEREOLITOGRAFIA**

**Dissertação submetida à**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA**

**Para obtenção do grau de**

**MESTRE EM ENGENHARIA DE MATERIAIS**

**MATHEUS MARAGNO BIAVA**

**Florianópolis, 2008.**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA DE MATERIAIS**

**FABRICAÇÃO RÁPIDA DIRETA E INDIRETA DE PEÇAS MINIATURIZADAS POR  
ESTEREOLITOGRAFIA**

**MATHEUS MARAGNO BIAVA**

**Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de  
MESTRE EM ENGENHARIA  
ESPECIALIDADE ENGENHARIA DE MATERIAIS  
sendo aprovada em sua forma final.**

---

**Prof. Gean Vitor Salmoria, Dr.  
Orientador**

---

**Prof. Carlos Augusto , Dr.  
Coordenador PGMAT**

**BANCA EXAMINADORA**

---

**Prof. Guilherme M. Barra, Dr. Eng.  
Presidente**

---

**Prof. Carlos Henrique Ahrens, Dr. Eng**

---

**Prof. Andrei Zwetsch Cavalheiro, Dr. Eng.**

*"O conhecimento nos faz responsáveis."  
[Ernesto Che Guevara]*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente as pessoas mais importantes da minha vida: Mãe, Thiago, Vó Zu, Vó Deli, Vô Dante, Tia Eve, Tia Inha, Gabi, Carol e Luca que são os grandes pilares da minha vida. Em especial agradeço uma das pessoas mais importantes que fez e ainda faz parte da minha vida, a eterna Tia Nilze Maragno.

Agradeço a minha namorada Jéssica B. Cruz que recentemente entrou na minha vida e vem se mostrando uma pessoa diferenciada pelo seu caráter, por sua simplicidade e principalmente inteligência.

Agradeço ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Santa Catarina, ao Ministério da Educação – CAPES, ao Ministério da Ciência e Tecnologia – CNPq. Pelo apoio financeiro durante esse trabalho.

Ao professor Gean Salmoria por ter aceitado o desafio de orientar e contribuir com esse trabalho.

Ao professor Carlos Henrique Ahrens pelo apoio, sugestões para realização deste trabalho.

Ao professor Antonio Pouzada da UMINHO em Guimarães – Portugal pela oportunidade de participar do Programa Plastinet e pelo auxílio no projeto das peças discolpino.

Aos professores Achim Frick e Uwe Berguer da Aalen University of Applied Sciences.

Aos amigos e companheiros de trabalho do CIMJECT: Paggi, Andrei, Lelo, Lafratta, Pedro, pelo ótimo ambiente de trabalho, contribuição direta nesse trabalho e pelos momentos de descontração.

Aos amigos de Urussanga: Cássio Daminai, Fabio Miranda, Marcelo Daminai, Cleber Zavarize, Ramon Betiol, Marco Antonio, Sandro Zanata, Marcelo Dalbo, Chico de Cesaro, Alano entre outros.

# SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	vi
LISTA DE TABELAS .....	vii
LISTA DE TABELAS .....	vii
ABSTRACT .....	x
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO .....	11
1.1 Definição do Problema .....	11
1.2 Objetivos .....	13
CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	14
2.1 Micro-Fabricação com Materiais Poliméricos .....	14
2.2 Técnicas de Micro-Fabricação com Materiais Poliméricos .....	16
2.2.1 Técnicas Diretas de Micro-Fabricação .....	16
2.2.2 Técnicas Indiretas de Micro-Fabricação .....	22
CAPÍTULO 3 - PARTE EXPERIMENTAL .....	31
3.1 Investigação das propriedades mecânicas de resinas de estereolitografia visando sua aplicação em molde para injeção de peças poliméricas miniaturizadas. ....	31
3.2 Determinação da exatidão e da precisão dimensional de peças miniaturizadas fabricadas diretamente e indiretamente por estereolitografia na máquina SL 250/30A... 32	
3.3 Determinação da exatidão e a precisão dimensional de peças miniaturizadas e análise do desempenho dos moldes fabricados na máquina SI Viper 2. ....	35
CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	40
4.1 Investigação das propriedades mecânicas de resinas de estereolitografia visando a sua aplicação em molde para injeção de peças poliméricas miniaturizadas.....	40
4.2 Determinação da exatidão e da precisão dimensional de peças miniaturizadas fabricadas diretamente e indiretamente por estereolitografia na máquina SL 250/30A... 45	
4.3 Determinação da exatidão e a precisão dimensional de peças miniaturizadas e análise do desempenho dos moldes fabricados na máquina SI Viper 2. ....	50
CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES .....	58
CAPÍTULO 6 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	59
ANEXO 1 – QUALIDADE DE TRABALHO E TOLERÂNCIA DIMENSIONAL SEGUNDO NBR ISO 2768-1 .....	63

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Atual estado de desenvolvimento da micro-fabricação (adaptado de [5]).	15
Figura 2 – Micrografia de micro-canais fabricados por ablação a laser [26].	17
Figura 3 – Métodos de fabricação utilizados na litografia [26].	18
Figura 4 – Esquema do processo de fabricação por estereolitografia [24].	21
Figura 5 - Etapas do processo de hot embossing: aquecimento do molde e aplicação de vácuo, moldagem e extração da micro-peça [6].	23
Figura 6 – Diagrama esquemático de uma máquina injetora empregando o processo de <i>variotherm</i> [32].	25
Figura 7 – Unidade de plastificação de uma micro-injetora (a). Tempo de permanência pelo volume do <i>shot</i> assumindo um ciclo de 10s (b) [37].	26
Figura 8 – Molde de estereolitografia e peças poliméricas injetadas sobre o molde [38].	27
Figura 9 – Representação das principais etapas do processo de fabricação de moldes por vazamento de resina [43].	30
Figura 10 – Geometria do corpo de prova utilizado na caracterização por DMA.	31
Figura 11 – Geometria e dimensões avaliadas	32
Figura 12 - a) Placas apresentando furos b) Placas apresentando pinos.	33
Figura 13 - a) Molde e inserto b) ejeção do inserto da cavidade.	34
Figura 14 - Peça com geometria de disco com cilindro concêntrico.	35
Figura 15 – Molde projetado para execução do trabalho.	36
Figura 16 - Pino localizado no centro da cavidade, e perfil de carregamento em função da posição do canal de injeção.	37
Figura 17 – Vista Superficial das posições definidas para avaliação dimensional.	39
Figura 18 – Curvas de tensão vs. deformação para a resina epóxi Vantico SL5260 a verde e em diferentes condições de pós-cura.	40
Figura 21 – Curvas de tensão vs. deformação para a resina epóxi SI 40 em diferentes condições de pós-cura.	43
Figura 22 - Módulo de armazenamento vs temperatura para corpos de prova da resina epóxi SI 40.	44
Figura 23 - Fator de perda ( $\tan \delta = E''/E'$ ) vs temperatura para corpos de prova da resina epóxi SI 40.	45
Figura 24 – Pinos separados e placa com furos fabricados diretamente	45
Figura 25 - Dimensões das arestas (b e d) e diâmetros (a e c) para geometria quadrática e circular como função dos ciclos de injeção.	49
Figure 27 - Figura ilustrando o preenchimento do molde SL e indicando o tempo de preenchimento da cavidade. Simulação usando o sistema CAE MoldFlow.	52
Figure 28 - Figura ilustrando o perfil de pressão durante preenchimento do molde. Simulação usando o sistema CAE MoldFlow.	53
Figura 29 - Regiões definidas para a avaliação da pressão durante preenchimento da peça.	54
Figura 30 - Número de ciclos realizados antes do surgimento da primeira falha por existência rebarba e por quebra de pino.	55
Figure 32 – Imagem da peça fabricada por injeção em molde SL.	56

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Dimensões das cavidades para avaliação dos moldes. ....	37
Tabela 2: Valores médios de módulos de elasticidade para corpos de prova da resina epóxi Vantico SL5260. ....	41
Tabela 3: Valores médios de módulos de elasticidade para corpos de prova da resina epóxi SI 40. ....	43
Tabela 4 – Valores dimensionais obtidos das placas com furos. ....	46
Tabela 5 – Avaliação dimensional nos pinos. ....	46
Tabela 6 – Parâmetros de processo usados durante o processo de injeção ....	47
Tabela 7 - Valores medidos no molde de SL. ....	48
Tabela 8 – Análise estatística ANOVA para um valor de $\alpha = 0,05$ ....	49
Tabela 9 - Valores médios e desvio padrão das dimensões do diâmetro externo (D) e do diâmetro do pino (d) das peças fabricadas diretamente por estereolitografia. ....	51
Peças miniaturizadas com razão de aspecto (R.A) especificadas. ....	51
Tabela 10 - Valores calculados para as tensões máximas permitidas nas regiões do pino e parede do molde. ....	52
Tabela 11 – Valores de pressão nas regiões 1, 2 e 3 em função do tempo no preenchimento. ....	54
Tabela 12 - Parâmetros usados na moldagem por injeção em molde SL. ....	54

## SIMBOLOGIA E ABREVIACÕES

MEMS – *Micro-Electro-Mechanical Systems* (micro-sistemas eletromecânicos)

SL - *Stereolithography* (Estereolitografia)

SLS - *Selective Laser Sintering* (Sinterização seletiva a laser)

MST – *Microsystem Technology*

Hz - Hertz

PMMA – Polimetilmetacrilato

PS - Poliestireno

PC - Policarbonato

PET - Polietilenotereftalato

UV – Ultra Violeta

PR – Prototipagem Rápida

CAD - *Computer Aided Design*

RP - *Rapid Prototyping* (Prototipagem rápida)

RT – *Rapid Tooling* (Ferramental rápido)

DMA - Dynamical Mechanical Analyses

FR – Fabricação Rápida



## RESUMO

Uma parte da indústria de fabricação de componentes plásticos vem sofrendo uma grande mudança devido às necessidades dos novos produtos. Um reflexo que em parte é evidenciado desde a última década com a miniaturização de simples dispositivos, bem como, de sistemas integrados. As técnicas de prototipagem e fabricação rápida, como a estereolitografia (SL) e a sinterização seletiva a laser (SLS) auxiliam o desenvolvimento de novos produtos em um curto prazo de tempo com redução de custos. A estereolitografia pode ser um instrumento no desenvolvimento de componentes miniaturizados, seja através da fabricação direta do componente ou através da fabricação indireta pelo processo de moldagem por injeção de termoplásticos. A metodologia de avaliação da técnica de SL para fabricação direta e indireta de micro-peças consistiu em 3 fases. A primeira fase esteve relacionada com a seleção das geometrias a serem empregadas no estudo. Na segunda fase o desenvolvimento das melhores condições de tempo e temperatura a serem utilizados no tratamento de pós-cura das resinas. Com a definição das geometrias e parâmetros de pós-cura das resinas, a última fase do trabalho foi à fabricação direta e indireta. A exatidão e precisão na fabricação direta e indireta apresentaram valores maiores do que 97%, com valores mais exatos e precisos para a geometria quadrática nos aspectos analisados.

## **ABSTRACT**

The plastic components industries are undergoing a great shift due to requirements of the new products. Examples of this are telecommunications, medical devices and electronics products that are currently following to miniaturization scale. As a consequence new micro fabrication processes are being developed in the world. SL is one of the most common RP used for product development purposes. On the other hand, SL molds have been characterized for the low volume of production caused by the premature mould failure in real conditions of process. The methodology used for evaluation of SL technology in the direct and indirect manufacturing was made on 3 steps. The first step geometries and dimensions are selected. After selection, the development of pos-cure treatment parameters was defined. With definitions of geometries and resin pos-cure parameters the evaluation was directioned for manufacture direct an indirect. The accuracy and precision in the direct manufacturing and the indirect manufacturing showed values up to 97%, being the square shape accuracy and precision higher than circular shape.

# CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

## *1.1 Definição do Problema*

Uma parte da indústria de fabricação de componentes poliméricos vem sofrendo uma grande mudança devido às necessidades dimensionais dos novos produtos. Uma evidência neste sentido está na miniaturização de dispositivos simples e de sistemas integrados. O fruto deste desenvolvimento pode ser visto em produtos populares como câmeras fotográficas embutidas em aparelhos celulares, impressoras a jato de tinta de alta precisão e também em outros produtos automobilísticos e biomédicos [1]. A consolidação do mercado de miniaturização é demonstrada pelo crescimento global previsto entre os anos de 2004 (12 bilhões de dólares) até 2009 (25 bilhões de dólares) [2-3].

Micro-peças, quando comparadas com macro-peças, possuem similares necessidades de projeto tais como propriedades, requisitos dimensionais e boa relação custo/benefício. Muitas vezes, a principal dificuldade na miniaturização de componentes e peças está relacionada com a limitação na exatidão e precisão dos processos de fabricação. O desenvolvimento de novos e a adaptação de processos existentes para a fabricação de componentes miniaturizados passam por aspectos como a modificação de máquinas e ferramentas, unificação de processos, melhorias na exatidão e precisão (*capability*) e fabricação de geometrias diferenciadas [4-6].

Os métodos de miniaturização e micro-fabricação de componentes poliméricos estão tornando-se uma importante alternativa de baixo custo para tecnologia de micro-sistemas eletromecânicos (MEMS) [7]. A micro-vácuo formagem (*hot-embossing*), a

abrasão a laser e a micro-moldagem por injeção são métodos de fabricação aplicáveis para uma grande diversidade de geometrias e de materiais poliméricos [8].

As técnicas de prototipagem e fabricação rápida, como a estereolitografia (SL) e a sinterização seletiva a laser (SLS) auxiliam o desenvolvimento de novos produtos em um curto prazo de tempo com redução de custos [9-13]. As principais aplicações do processo de estereolitografia são: a fabricação rápida de protótipos e ferramentas protótipos usados nas indústrias elétrica, automobilística, aeroespacial e biomédica [14-17]. Esta técnica permite a criação de objetos na faixa de um metro até décimos de milímetros com exatidão na ordem de micrometros [18-19]. A estereolitografia pode ser um potencial instrumento no desenvolvimento de componentes miniaturizados, seja através da fabricação direta do componente ou através da fabricação indireta usando moldes de estereolitografia na injeção de termoplásticos. Neste trabalho busca-se investigar as potencialidades do uso da estereolitografia na fabricação rápida direta e indireta de componentes poliméricos miniaturizados.

## **1.2 Objetivos**

### Objetivo Geral:

Investigar o emprego da técnica de estereolitografia para a fabricação direta e indireta de peças poliméricas miniaturizadas.

### Objetivos específicos:

- Investigar as propriedades mecânicas de resinas de estereolitografia visando sua aplicação em molde para injeção de peças poliméricas miniaturizadas.
- Determinar a exatidão e a precisão dimensional de peças miniaturizadas fabricadas diretamente e indiretamente por estereolitografia na máquina SL 250/30A.
- Determinar a exatidão e a precisão dimensional de peças miniaturizadas fabricadas diretamente e indiretamente por estereolitografia na máquina SI Viper 2.
- Analisar o desempenho dos moldes fabricados na máquina SI Viper 2.
- Avaliar as particularidades do uso da estereolitografia na fabricação rápida direta e indireta de peças miniaturizadas.

## CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

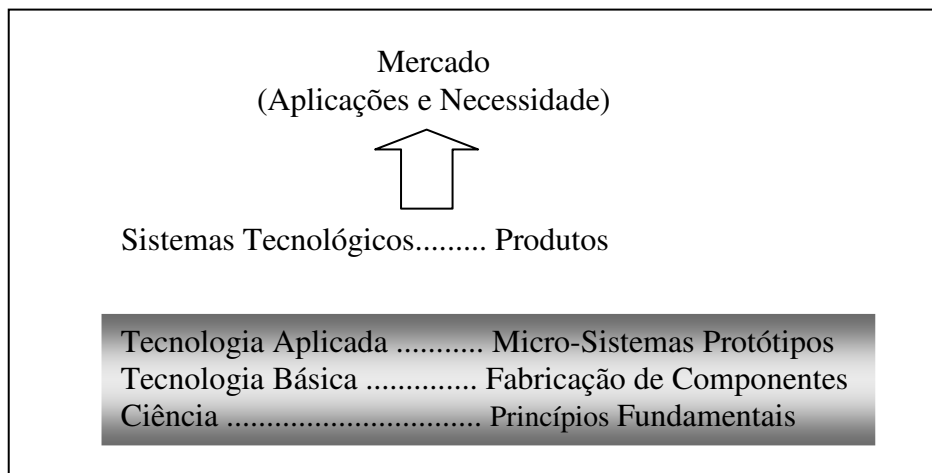
### 2.1 *Micro-Fabricação com Materiais Poliméricos*

Micro-fabricação tem sido definida como o processo de fabricação de peças com: i) massa na escala de miligramas, ii) geometrias micrométricas, e iii) exatidão dimensional micrométrica [20]. Controvérsias existem nas definições de micro-peças encontradas na literatura. Peças com massa na faixa de miligramas, não necessariamente possuem dimensões micrométricas. Peças milimétricas podem apresentar estruturas (*features*, pinos, furos e outros) com dimensões micrométricas, onde a tolerância seja de poucos microns.

Os materiais poliméricos têm um importante papel na tecnologia de micro-sistemas (MST), pois estão envolvidos em uma grande variedade de aplicações. As mais importantes são em micro-tubos, dispositivos e instrumentos eletrônicos e médicos [22-23]. Esta ampla faixa de aplicação é consequência do emprego destes materiais em quase todos os processos de moldagem [24-25]. Muitas das tecnologias empregadas na micro-fabricação de materiais termoplásticos são tecnologias já existentes, porém adaptadas para a miniaturização de estruturas, dispositivos e sistemas como o *hot embossing*, uma micro-vácuo moldagem [26-28].

Na micro-moldagem os custos de fabricação são afetados pela complexidade do projeto. Os custos com matéria-prima, em muitos casos, são inexpressivos, devido ao baixo volume de material necessário para a obtenção de uma micro-peça. Além disso, peças fabricadas por micro-moldagem, até mesmo de materiais com bom acabamento são adequadas para aplicações de baixo custo em componentes descartáveis [6].

O futuro da micro-fabricação é bastante promissor, uma vez que os novos sistemas tecnológicos (de informação, defesa, diversão, saúde e outros) criarão a necessidade no mercado do desenvolvimento de micro-componentes, fomentando uma maior industrialização [5,29].



**Figura 1 – Atual estado de desenvolvimento da micro-fabricação (adaptado de [5]).**

Atualmente, a pesquisa no desenvolvimento destas tecnologias vem sendo a força motriz para estudos básicos e aplicados de micro-sistemas. A figura 1 ilustra o estado atual do desenvolvimento de micro-sistemas e componentes. A área escura indica o atual estado da miniaturização, com as necessidades da tecnologia aplicada gerando a fundamentação pela tecnologia básica. Os resultados destas fundamentações serão fundamentais para as aplicações no desenvolvimento dos novos sistemas tecnológicos motivados pelas necessidades mercado.

## ***2.2 Técnicas de Micro-Fabricação com Materiais Poliméricos***

Um grande número de tecnologias para micro-fabricação em materiais poliméricos vem sendo estabelecido ao final dos últimos anos [6]. Estas tecnologias podem ser divididas em técnicas de fabricação diretas e técnicas de fabricação indiretas ou de replicação.

### ***2.2.1 Técnicas Diretas de Micro-Fabricação***

Nas técnicas diretas cada peça ou componente é produzido diretamente em um equipamento através da retirada ou adição de material. Muitos dos métodos de fabricação direta utilizam princípios eletro-térmicos e fotoquímicos.

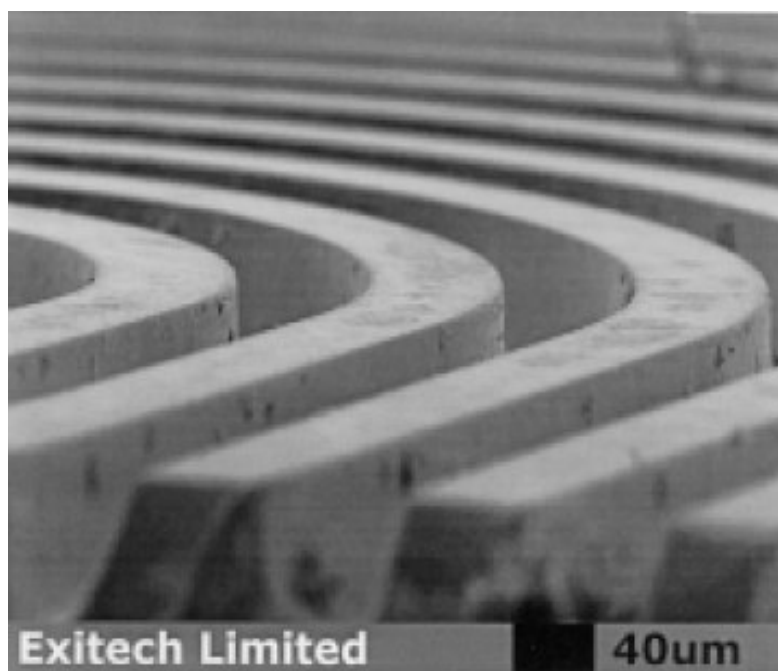
#### ***Ablação a Laser***

Uma das mais extensivas tecnologias para fabricação de micro-componentes é a ablação a laser. Neste processo, a energia de um pulso de laser é usada para quebrar as ligações das cadeias poliméricas e remover os fragmentos do polímero decomposto da região de ablação. O laser com comprimento de onda de 193nm (ArF) ou 248nm (KrF) com frequências de pulso entre 10 e 100 Hz é usado em uma base x-y na qual o substrato é montado. Uma máscara define a região a ser atingida. Dependendo da energia disponível pelo pulso de laser o substrato será processado em dimensões de nanômetros até micrometros no eixo z.

Com esta tecnologia, uma grande faixa de materiais poliméricos, incluindo PMMA, PS, PC, PET tem sido fabricados. A exatidão do processo nas direções x-y é principalmente dependente da distribuição de energia no feixe e a qualidade da máscara de seção x-y, tipicamente na ordem de poucos microns. O controle de profundidade depende do tempo de



exposição e da interação da luz do laser com o material. Certas modificações são induzidas na composição da superfície do material em comparação com o material não tratado. A figura 2 apresenta secção de micro-canais fabricados por ablação a laser. O principal impedimento da expansão desta tecnologia é o alto custo do equipamento de laser nestes comprimentos de onda ( $< 200 \text{ nm}$ ) e da manutenção deste [26].



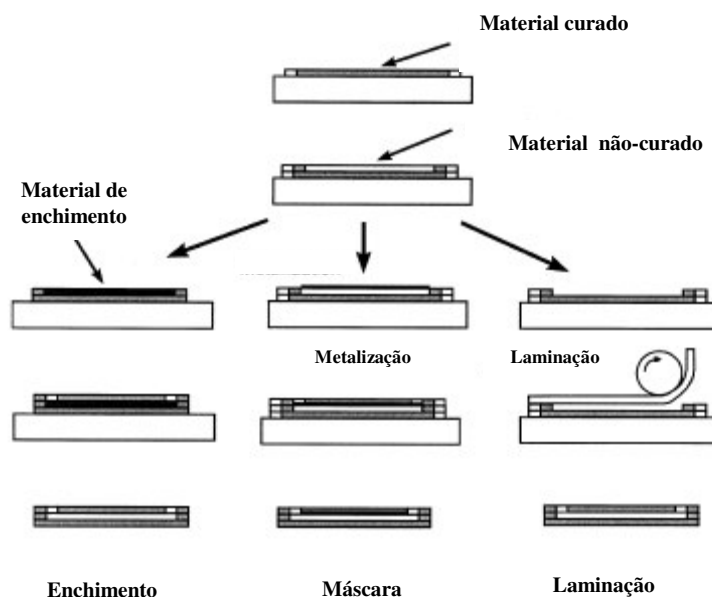
**Figura 2 – Micrografia de micro-canais fabricados por ablação a laser [26].**

### ***Litografia Óptica***

Nos processos de litografia um padrão é formado diretamente a partir de um polímero fotossensível que é depositado e processado pela exposição a luz ultra-violeta (UV) ou indiretamente através do uso de máscaras. Então, uma segunda camada é adicionada à superfície e processada idênticamente. Utilizam-se materiais de enchimento para estabilizar estruturas foto-processadas. Ao final da fabricação o material de

enchimento é retirado por solubilização. Variáveis podem ocorrer neste processo com a utilização ou não de máscaras, normalmente metálicas e enchimentos.

A figura 3 ilustra o processo de fabricação por litografia e suas variantes.



**Figura 3 – Métodos de fabricação utilizados na litografia [26].**

Todos os três processos têm em comum primeiros passos a deposição de uma camada base de resina foto-sensível, que é processado pela exposição com UV luz. Uma segunda camada de resina é adicionada e processada identicamente. O processo chamado de enchimento, uma camada de outro polímero (ex. Araldite) é usado para preencher um canal litograficamente definido num passo anterior. Após o preenchimento do canal, outra camada de polímero é adicionada ao topo, exposta e curada. O polímero preenchido é dissolvido, assim criando um micro canal com sistema fechado.

No processo máscara a segunda camada do polímero não é desenvolvida. Ao invés uma camada de metal, que atua como uma sombra é depositada sobre o topo da segunda camada do polímero. Uma terceira camada é então realizada. Posteriormente, com o

desenvolvimento das camadas ocorre uma dissolução do material na região da sombra, formando assim o canal. Esta dissolução, no entanto, é em um processo lento e este leva muitas horas para um canal de 10 mm de comprimento para formar um canal com secção de 50 por 50  $\mu\text{m}$ . O processo de laminação, o primeiro passo é idêntico com o processo de enchimento. Na proximidade dos canais, no entanto, uma camada de um filme seco do polímero é laminado do topo da “pilha”. A vantagem deste método é o curto tempo de processamento, pois não necessita a dissolução de material [26].

### ***Estereolitografia (SL)***

Com o objetivo de se produzir um protótipo físico tridimensional, ou com o intuito de se proceder a uma avaliação mais eficaz do produto, a tecnologia de prototipagem rápida tem evoluído continuamente nos últimos 20 anos em diferentes setores industriais. O primeiro processo de prototipagem rápida (PR) foi a estereolitografia, desenvolvido em 1986 por Charles Hull, em que a construção de objetos faz-se através da cura de camadas sucessivas de resina líquida sensível à luz ultravioleta. Para tal utiliza-se um laser de baixa potência.

Com a introdução da prototipagem rápida os modelos em CAD puderam materializar-se em modelos físicos. Usualmente, divide-se a prototipagem rápida em dois grupos:

- técnicas baseadas em deposição por camadas
- técnicas baseadas em usinagem com altas velocidades de corte.

As técnicas de usinagem com altas velocidades de corte apresentam-se limitadas devido ao fato de apenas permitir a remoção de material que pode ser alcançado pela aresta cortante

da ferramenta. Quando comparados com os métodos de fresagem rápida, os métodos de fabricação baseada em deposição de camadas apresentam ainda a vantagem de se fabricar a peça numa única etapa, não havendo risco de erros de posicionamento nem necessidade de se fabricar dispositivos de fixação.

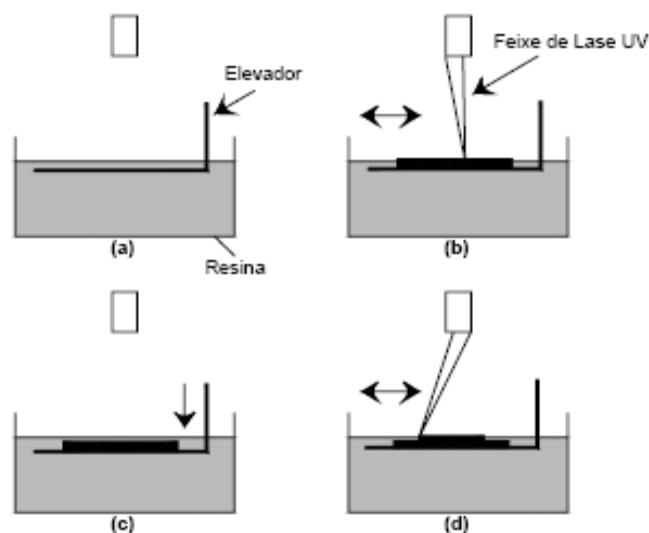
O ponto inicial da PR é um modelo virtual tridimensional em CAD (*Computer Aided Design*) que normalmente é convertido em um arquivo STL (*Surface Tessellation*). Esse modelo é então “fatiado” em camadas que serão adicionadas sucessivamente, com o auxílio de um sistema CAM (*Computer Aided Manufacturing*) de forma a se produzir o objeto físico.

Nos processos em que a construção é feita camada por camada, dá-se o problema da falta de continuidade, causada pela espessura das camadas (efeito escada), que pode ser minimizado pelo software ou pela alteração da orientação de construção. O aspecto final da peça pode ser melhorado através de operações de acabamento, tais como polimento ou recobrimento, dependendo do seu uso final [9].

A estereolitografia é um processo foto-químico de construção por camadas em que os protótipos são fabricados através da polimerização de uma resina líquida por ação de um laser ultravioleta (300 – 400 nm) [18]. Após a produção de cada camada (de 50 a 150  $\mu\text{m}$ ), a plataforma desce para que a camada solidificada possa ser uniformemente recoberta por resina líquida, com a ajuda de uma lâmina devido à alta viscosidade da resina, iniciando-se o ciclo de construção de uma nova camada. O processo é repetido até que todas as camadas sejam construídas e o modelo finalizado, conforme ilustrado na figura 4.

Após a construção da peça, é necessário proceder-se a uma etapa de pós-cura de forma a promover uma maior densidade de ligações cruzadas da resina [30-31]. Essa

polimerização final é feita com o auxílio de radiação ultravioleta, mas também se pode recorrer por aquecimento convencional ou microondas. A pós-cura por microondas mostra-se bastante eficiente para peças com grande espessura devido a maior penetração de energia. O tempo da pós-cura depende de fatores tais como a natureza da resina e os parâmetros de construção, bem como da trajetória e potência do laser.



**Figura 4 – Esquema do processo de fabricação por estereolitografia [24].**

Um fator que determina o tempo de fabricação é o número de camadas, que depende da espessura de camada bem como da orientação da peça. O pós-processamento também é, em grande parte, responsável pelo tempo relativamente grande de produção de um protótipo uma vez que a pós-cura, quando conduzida por radiação ultravioleta ou aquecimento convencional pode demorar de 1 a 10 horas, dependendo do volume da peça. Vale lembrar que os procedimentos de limpeza e acabamento que podem demorar mais ou menos tempo, dependendo do grau de complexidade geométrica da peça produzida.

As resinas apresentam propriedades mecânicas limitadas, levando à afirmação de que os protótipos produzidos por SL se limitam no uso à mera avaliação visual e funcional,

não podendo ser utilizados nas condições de trabalho. No entanto, existem diferentes resinas de estereolitografia disponíveis comercialmente que tentam reproduzir as características de alguns dos materiais poliméricos mais utilizados permitindo a fabricação de pequenas peças e estruturas com dimensões na ordem de micrometros.

### ***2.2.2 Técnicas Indiretas de Micro-Fabricação***

O uso de técnicas de replicação (ou técnicas indiretas de fabricação) utilizando moldes e matrizes para a produção de micro-peças faz-se necessário quando os processos de fabricação direta não permitem fabricar facilmente um número elevado de peças ou processar um determinado material.

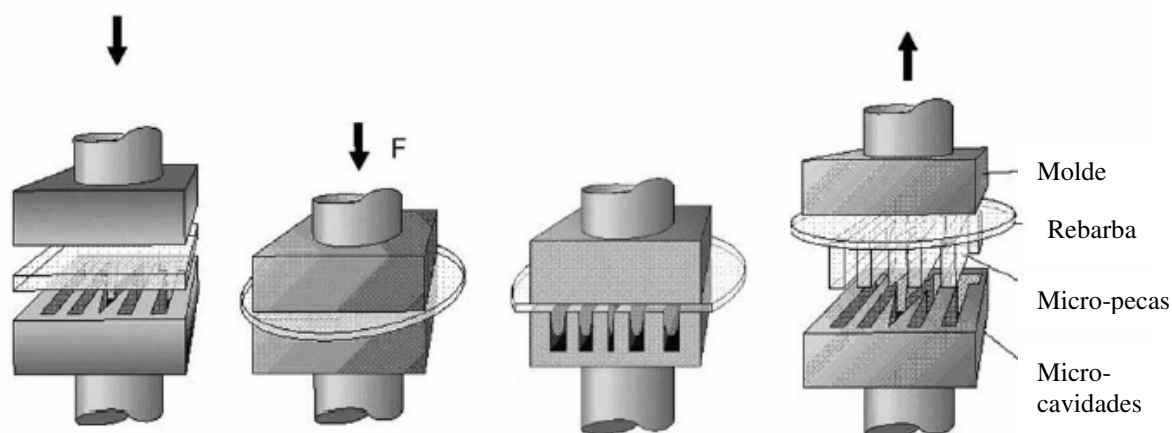
#### ***Moldagem Reativa***

Neste processo dois componentes de um sistema termofixo ou elastomérico são injetados para a cavidade de um molde. A fabricação de micro-peças por esta técnica foi bastante investigada na década de 80, mas apresentou dificuldade de produção devido a dificuldades de mistura entre os componentes e a ocorrência de longos ciclos devido a reação química ativada termicamente. Atualmente, com a possibilidade da cura por UV, este processo tem sido alvo de investigação [6,23].

#### ***Hot Embossing***

O processo de *hot embossing* é um tipo de processamento similar ao processo de termoformagem a vácuo, no qual uma lamina polimérica é moldada sob pressão acima da temperatura de transição-vítrea ( $T_g$ ) sobre pressão. Esta técnica possibilita a fabricação de

micro peças com elevada precisão e qualidade, sendo as aplicações ópticas o maior campo de utilização desta técnica. As principais etapas do processo de *hot embossing* são ilustradas na figura 5. Um filme polimérico é inserido na máquina sobre uma ferramenta (molde ou matriz). Em uma câmara evacuada o filme polimérico é aquecido acima da  $T_g$ , sendo posteriormente pressionado contra o molde. O vácuo é necessário para prevenir a formação de bolhas pelo aprisionamento de ar nas pequenas estruturas do molde. Em seguida, o sistema é resfriado e a micro-peça é retirada do molde. Em contraste com a moldagem por injeção, no processo de *hot embossing*, são necessários polímeros com menor fluidez para a replicação do molde.



**Figura 5 - Etapas do processo de hot embossing: aquecimento do molde e aplicação de vácuo, moldagem e extração da micro-peça [6].**

O processo de *hot embossing* é constituído por um sistema simples, o *set-up* é realizado em curtos espaços de tempo. Além disso, diversas classes de polímeros podem ser empregadas sucessivamente no equipamento. Longos ciclos são necessários pelo fato de que o aquecimento do polímero não é realizado por uma unidade de injeção. Valores de um ciclo total de fabricação para materiais como PMMA são da ordem de 5 a 7 minutos [26, 32-34].

### ***Moldagem por Injeção de Micro-peças***

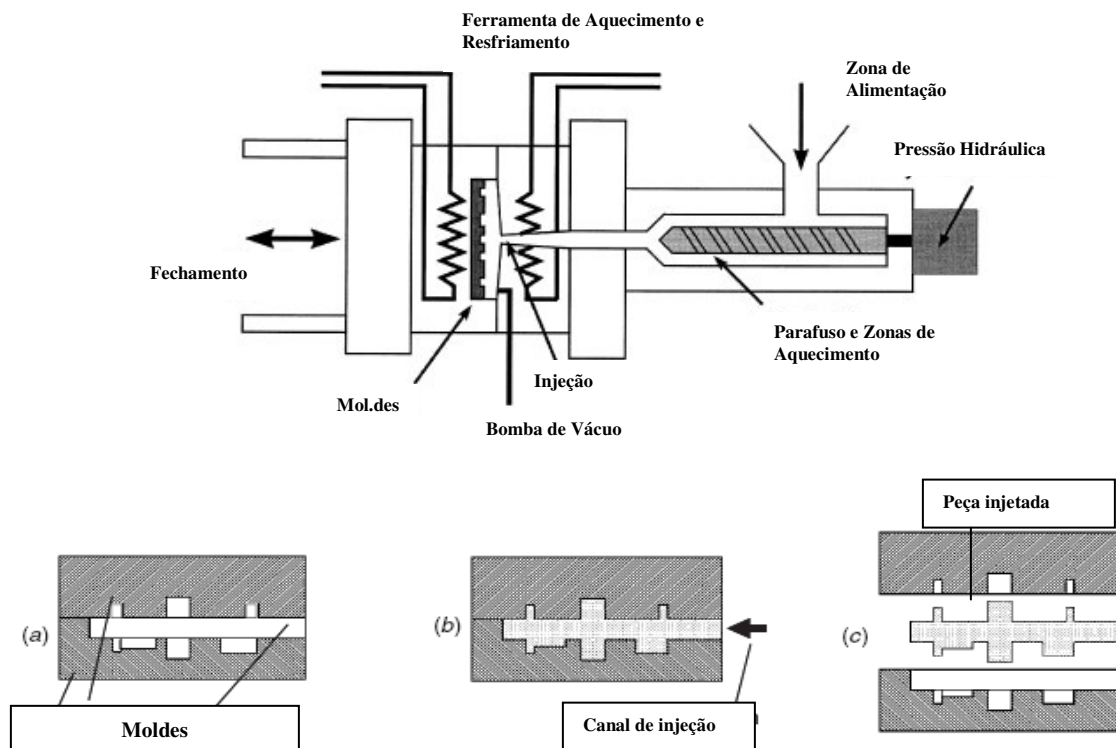
A moldagem por injeção é uma técnica bem estabelecida e um processo econômico para a fabricação de micro-peças de geometria complexa em grande volume. Além disso, um *know-how* e uma imensa variedade de equipamentos estão disponíveis para serem utilizados na fabricação de micro-peças. Entretanto, comuns parâmetros de moldagem de injeção empregados na macro-escala como baixa temperatura do molde e pressões de injeção propiciam o preenchimento incompleto das microestruturas presentes nos moldes.

Um dos fatores para esta característica é o menor volume de material injetado na cavidade e o aumento da razão superfície-volume [26]. Uma alternativa comumente utilizada é o aquecimento do molde a uma temperatura acima da temperatura de transição-vítrea ( $T_g$ ) para materiais amorfos e da temperatura de fusão para materiais semi-cristalinos [6,26,32-36]. Este processo é chamado de *variotherm* e permite a fabricação de estruturas menores do que a moldagem com a cavidade fria. Porém, um aumento do tempo de ciclo de processo ocorre pelo aquecimento e resfriamento do molde. Durações de ciclos de micro-injeção são da ordem de 1 - 3 minutos [26]. A figura 6 apresenta o processo *variotherm*, o qual compreende os seguintes passos: *a*) a cavidade do molde (*mold inserts*) é fechada, posteriormente evacuada e aquecida até temperatura ideal para processamento; *b*) a unidade de injeção aquece e pressiona o polímero viscoso para dentro do molde; *c*) o polímero e o molde são resfriados até uma ideal temperatura. Esta é determinada pela resistência do material e das características da micro-peça.

As necessidades do desenvolvimento confiável e econômico são altamente dependentes dos sistemas de manufatura. Máquinas injetoras convencionais são capazes de



fabricar micro-peças, porém as características de projeto e as propriedades exigidas para um padrão de qualidade delimitam o seu uso.



**Figura 6 – Diagrama esquemático de uma máquina injetora empregando o processo de *variotherm* [32].**

Assim, micro-injetoras foram desenvolvidas possibilitando o processamento de pequenas quantias de polímero fundido sobre condições controladas. Essas máquinas possuem reduzido diâmetro de parafuso na unidade plastificadora. Conseqüentemente, o volume residual de material no parafuso é menor e um maior controle do movimento da rosca pode ser alcançado. Quando ambas as necessidades são cumpridas, há um grande acréscimo na qualidade da micro-peça em precisão dimensional e custos [37]. A figura 7a apresenta uma unidade de plastificação de uma micro-injetora, enquanto a figura 7b, um gráfico comparativo do tempo de permanência para diferentes volumes de injeção em zonas

de plastificação com diâmetros de parafuso de 12 mm e 15 mm. O tempo de ciclo assumido é igual a 10s.

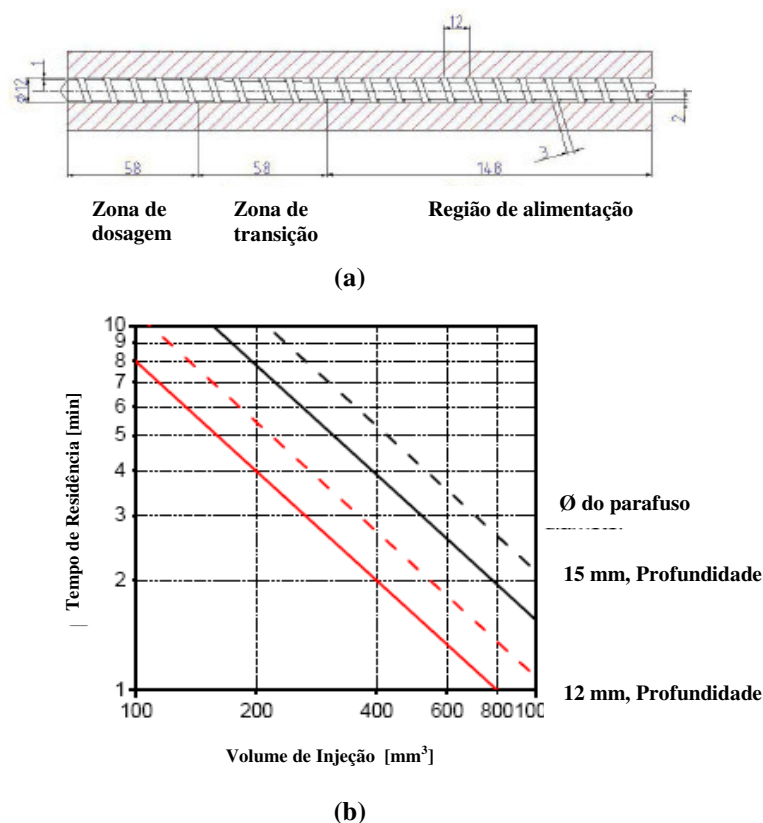
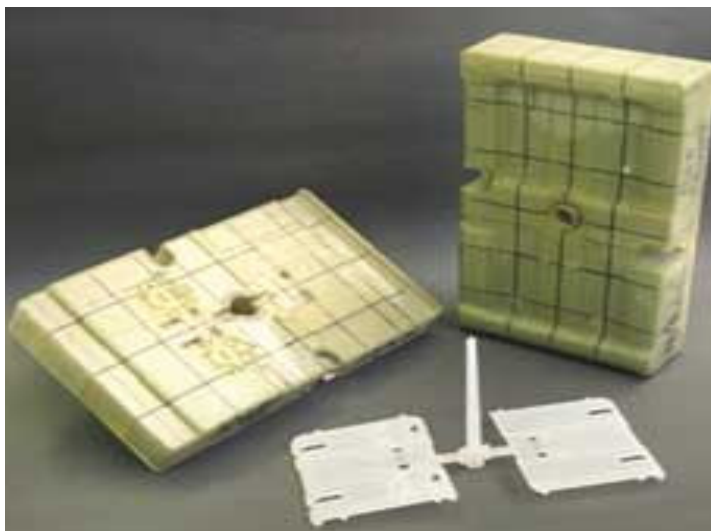


Figura 7 – Unidade de plastificação de uma micro-injetora (a). Tempo de permanência pelo volume do *shot* assumindo um ciclo de 10s (b) [37].

### *Moldagem por Injeção em Moldes Protótipos*

A produção de um molde envolve um grande investimento financeiro e longo tempo de fabricação. Assim sendo, a produção de moldes através das técnicas de prototipagem rápida e ferramental rápido se apresenta indiscutivelmente atrativa, uma vez que permite a produção de peças injetadas no material desejado, em menos tempo e investindo-se menos dinheiro. Portanto, flexibiliza-se o projeto e produção de peças injetadas. A figura 8 ilustra peças produzidas e o molde de estereolitografia.



**Figura 8 – Molde de estereolitografia e peças poliméricas injetadas sobre o molde [38].**

Existem limitações nas diferentes técnicas de prototipagem, relacionadas com o alto custo da produção de protótipos múltiplos e com a baixa disponibilidade de materiais nas técnicas de PR. Essas limitações, aliadas à necessidade dos fabricantes em obterem séries de protótipos fabricados no material definitivo, impulsionaram o surgimento da fabricação rápida de ferramentas, conhecido como ferramental rápido (FR).

Essas técnicas de FR apresentam-se particularmente interessantes devido à tendência da indústria em produzir pequenos lotes com uma elevada diversificação de produtos, pois com o desenvolvimento de novos materiais, é possível produzir ferramentas rápidas capazes de resistir a um grande número de ciclos. Como existe um grande número de técnicas disponíveis para a produção de ferramentas rápidas, apareceu a necessidade de se proceder à sua classificação em grupos, podendo-se basear na aplicação, no número de peças produzidas pela ferramenta ou na forma como são produzidas as ferramentas. No caso em que a classificação é feita de acordo com a forma como as ferramentas são produzidas, a divisão é feita em processos diretos e processos indiretos de fabricação.

No ferramental rápido direto, a ferramenta é produzida diretamente a partir de uma técnica de PR. Já no caso do ferramental rápido indireto, utiliza-se um modelo, normalmente fabricado por PR, para a produção da ferramenta. Uma das vantagens do processo direto é a diminuição do número de operações e, conseqüentemente, a diminuição de tempo e custo de produção além de aumentar a precisão final do produto. A escolha da técnica de ferramental rápido para uma determinada finalidade depende da análise de desempenho, custos e tempos de processamento, além de se verificar a capacidade técnica de processamento dessa mesma técnica [37-42].

### ***Ferramental Rápido Direto***

Na produção direta de moldes de estereolitografia para injeção de termoplásticos podem-se utilizar moldes maciços ou em casca, onde posteriormente se coloca material de preenchimento. A grande vantagem dos moldes em casca é a diminuição dos custos. Um fato a levar em conta é que resinas foto-poliméricas apresentam baixas temperaturas de transição vítrea ( $T_g < 90^\circ\text{C}$ ) e condutividade térmica. Por esse motivo é necessário implementar sistemas de resfriamento e assim evitar-se a falha do molde pela diminuição abrupta da sua resistência mecânica [43-45].

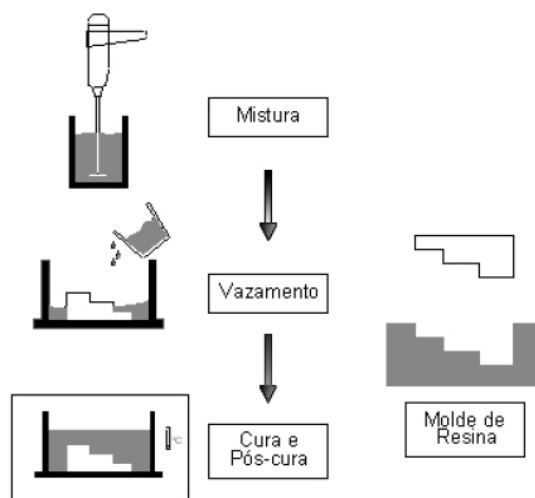
A quantidade de peças produzidas depende da sua complexidade geométrica, parâmetros de injeção, material a ser injetado e o material com que os moldes foram fabricados. A injeção de termoplásticos apolares com menor ponto de fusão, tais como o PP e o PE, apresentam bons resultados quando injetados em moldes SL. A injeção de PET e PA 6,6 em moldes SL apresentam problemas de adesividade entre o material injetado e o molde, devido a afinidade química.

Existem poucos trabalhos publicados onde se aplica ferramental rápido por modelamento por fusão e deposição (FDM) na moldagem por injeção, provavelmente devido às dificuldades relacionadas com o fato que os materiais utilizados na fabricação do molde são termoplásticos que podem amolecer e fundir, ou ainda apresentarem adesão quando injetadas peças em termoplásticos com polaridade semelhante. No entanto, Foggiatto [46] utilizou moldes FDM na moldagem por injeção de termoplásticos, evitando problemas de adesividade baseado na seleção de materiais por propriedades químicas. Na seleção dos materiais deve-se também considerar a temperatura de injeção e resistência mecânica. Podem utilizar-se moldes em ABS para injetar materiais como PP, PEBD e PEAD, e moldes de PC e PPSF podem ser usados na injeção desses mesmos materiais, bem como POM e PA 6,6. Uma desvantagem neste processo é a rugosidade das peças injetadas.

#### ***Ferramental Rápido Indireto (vazamento de resinas epóxi com carga)***

Este é um método indireto simples, rápido e econômico, para produzir componentes e ferramentas para moldagem por injeção de pequenas séries de peças funcionais. Primeiro fabrica-se um modelo, que pode ser construído por uma técnica de prototipagem rápida, que é colocado numa caixa de moldagem (figura 9). Após o modelo ser coberto com agente desmoldante, é definida uma linha de partição. A resina é então vazada para a caixa de moldagem até que complete metade do molde. Após a cura, o mesmo procedimento é seguido na fabricação da outra metade do molde. Posteriormente ao vazamento da resina com o seu endurecedor, o conjunto é colocado em uma câmara de vácuo de forma a se minimizar a presença de bolhas no interior da resina. Em seguida, efetua-se a sequência de cura, normalmente indicada pelo fornecedor da resina.

Após completar estas fases, é feito o acabamento dos moldes que depois são instalados no porta moldes. Esse acabamento pode ser o polimento e a inserção de canais de resfriamento, no caso de não terem sido inseridos durante a preparação por vazamento dos moldes [43].



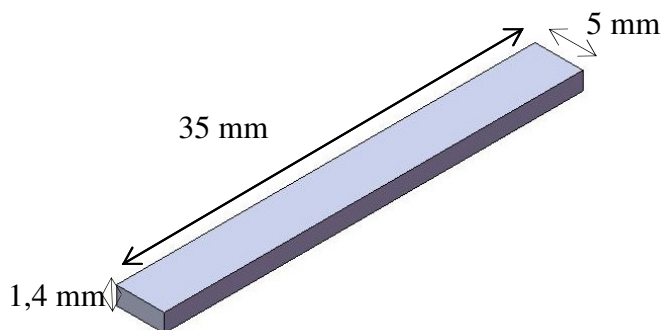
**Figura 9 – Representação das principais etapas do processo de fabricação de moldes por vazamento de resina [43].**

Normalmente é utilizada a resina epóxi como matriz com algum tipo de carga, de forma a reduzir o desgaste da ferramenta e melhorar a transferência de calor, além de se reduzir o custo da resina. Dependendo do tipo de material injetado no molde de resina, o número de peças injetadas pode variar de 100 a 200 até cerca de 1000. Tendo em conta esta capacidade de produção de peças injetadas, é possível utilizar-se este método na fabricação comercial de pequenos lotes de peças. É um método rápido, relativamente simples, e que pode ser utilizado na moldagem por injeção de termoplásticos comuns, utilizando-se técnicas de injeção convencionais que podem ser usadas em micro-moldagem.

## CAPÍTULO 3 - PARTE EXPERIMENTAL

### *3.1 Investigação das propriedades mecânicas de resinas de estereolitografia visando sua aplicação em molde para injeção de peças poliméricas miniaturizadas.*

Os corpos de prova foram fabricados pelas máquinas de SL (SLA 250/30A e SI Viper 2) apresentando dimensões de 35 x 5 x 1,4 mm (figura 10), para a investigação das propriedades mecânicas das resinas de estereolitografia Vantico SL5260 fornecida pela Hunstman e resina SI 40 fornecida pela Accura S/A. O processo de pós-cura sob radiação ultravioleta (UV) foi investigado para os tempos de exposição sob radiação (UV) de 30, 60 e 90 minutos.



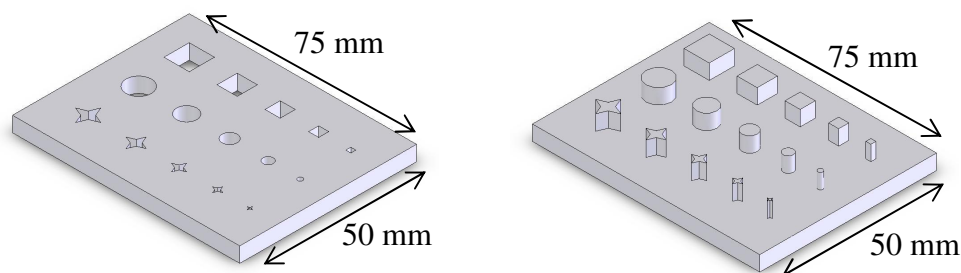
**Figura 10 – Geometria do corpo de prova utilizado na caracterização por DMA.**

Posteriormente, estes corpos de prova foram avaliados mecanicamente em um equipamento dinâmico-mecânico (DMA), modelo Q800 fabricado pela TA Instrumentos. O ensaio de flexão foi realizado no modo de carregamento *single-cantiliver* do tipo barra engastada. As curvas de tensão-deformação foram obtidas com uma taxa de deformação 2 mm/min a uma temperatura de 30 °C.

O módulo de armazenamento ( $E'$ ) e o fator de perda ( $\tan \delta = E''/E'$ ) foram obtidos sob uma frequência de 1 Hz em uma faixa de temperatura de 30 a 250 °C, com uma taxa de aquecimento de 3 °C/min.

### ***3.2 Determinação da exatidão e da precisão dimensional de peças miniaturizadas fabricadas diretamente e indiretamente por estereolitografia na máquina SL 250/30A.***

As geometrias empregadas na determinação no estudo de exatidão e precisão foram qualitativamente definidas através da análise visual de placas contendo furos e pinos com geometrias de quadrados, círculos e estrelas, fabricadas diretamente. As dimensões variaram de 1 até 5 milímetros, com a profundidade dos furos e altura dos pinos sendo 3 de milímetros. A figura 11 apresenta as placas com as respectivas geometrias.



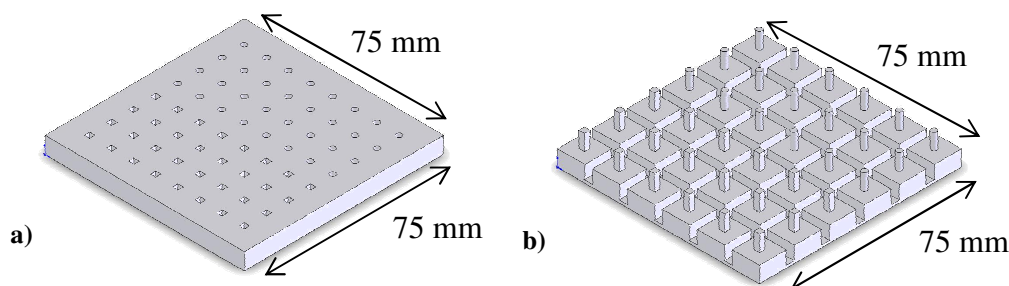
**Figura 11 – Geometria e dimensões avaliadas**

Entre as três geometrias, somente as geometrias do quadrado e do círculo foram utilizadas na continuidade da avaliação devido à facilidade para medição de dimensões. As dimensões empregadas foram de 1 milímetro para fabricação direta e 2 milímetros para fabricação indireta (moldagem por injeção).



A fabricação direta foi conduzida em uma máquina de estereolitografia SL 250/30A fabricada pela 3D System e a fabricação indireta com uma máquina injetora Arburg 320S 500/150 em um molde de estereolitografia. A resina epóxi Vantico SL5260 fornecida pela Hunstman foi usada no processo de fabricação das placas. Após o processo de fabricação, as pequenas peças e os moldes foram pós-curadas.

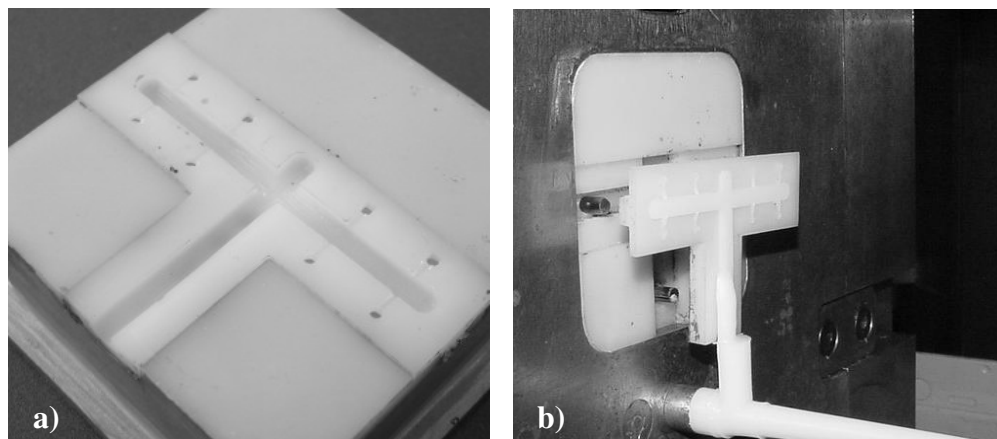
Para a avaliação da fabricação direta, as peças miniaturizadas foram fabricadas em placas. A figura 12 ilustra estas placas contendo a geometria de furo e pino. Nos estudos de fabricação indireta os moldes de SL fabricados apresentavam 8 cavidades no total: 4 com geometria quadrática e 4 com geometria com geometria circular. Os moldes foram pós-curados por radiação UV.



**Figura 12 - a) Placas apresentando furos b) Placas apresentando pinos.**

Após o tratamento, a parte posterior do molde foi preenchida com resina epóxi (Huntsman RenCast CW 436). Para facilitar a ejeção um sistema inserto foi acoplado no molde, como apresentado na figura 13. A figura 13a apresenta o molde com o inserto, enquanto na figura 13b, o inserto sendo ejetado. Um total de 3 sistemas de insertos foram fabricados. O material ABS M301AS fornecido pela GE e o material POM M90 fornecido

pela Celcon foram empregados na fabricação indireta. O método de *short shot method* [44] foi aplicado para determinar os parâmetros do processo de injeção.



**Figura 13 - a) Molde e inserto b) ejeção do inserto da cavidade**

A análise dimensional foi baseada sobre avaliação estatística, sendo a exatidão total, a exatidão individual, precisão e tolerância dimensional definidas pelas equações abaixo:

$$Exatidão = [1 - (|valor nominal - valor médio|) / valor nominal] * 100 \quad Eq. 1$$

$$Precisão = [(média - desvio padrão) / média] * 100 \quad Eq. 2$$

$$Tolerância = (média + desvio padrão) - (média - desvio padrão) \quad Eq. 3$$

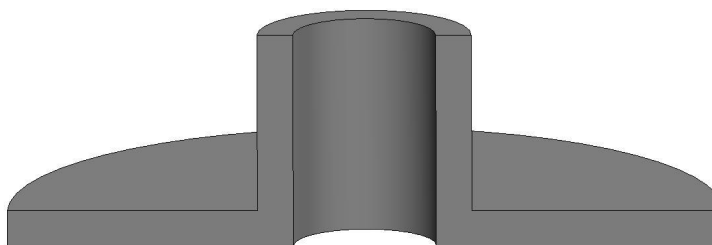
A avaliação dimensional das placas com furos foram realizados usando um microscópio óptico Leica DMLM por luz transmitida, e analisadas dimensionalmente pelo software ESSS Imago 2.2, com resolução de 1,639  $\mu m$ . As formas foram medidas usando os seguintes procedimentos:

- Geometria Quadrática – medidas foram realizadas nas direções horizontal, vertical e diagonal.
- Geometria Circular – medidas foram realizadas nos ângulos 0° e 90°.

As placas com pinos foram medidas usando um micrometro Digimatic Micrometer modelo MDC-25PJ fabricado pela Mitutoyo, com resolução de  $1\mu\text{m}$ . Ambos os lados da geometria quadrática foram medidos. Na fabricação indireta, o método de avaliação dimensional foi o mesmo adotado na avaliação da peças diretamente fabricadas.

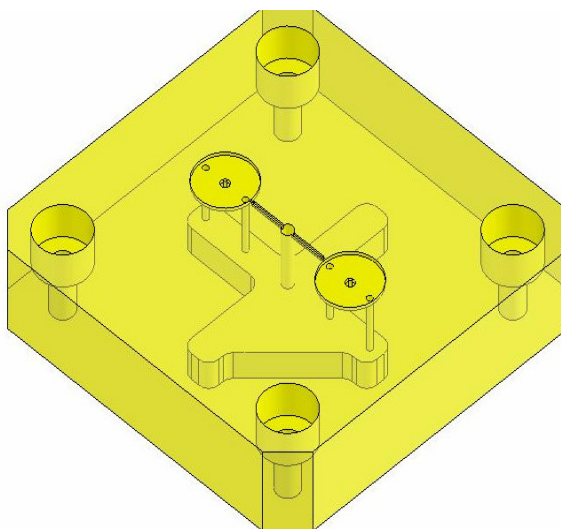
### ***3.3 Determinação da exatidão e a precisão dimensional de peças miniaturizadas e análise do desempenho dos moldes fabricados na máquina SI Viper 2.***

Para o estudo de exatidão e precisão dimensional de peças miniaturizadas, bem como para a análise do desempenho dos moldes fabricados na máquina SI Viper 2, inicialmente foram projetadas peças com geometria de disco com cilindro concêntrico (figura 14).



**Figura 14 - Peça com geometria de disco com cilindro concêntrico.**

Cálculos estruturais de resistência do molde SL em relação a razão de aspecto da altura/diâmetro do pino central da peça foram realizados. O molde projetado consistia de duas cavidades de geometria circular, com um pino localizado na região central da cavidade. O molde é apresentado na figura 15.



**Figura 15 – Molde projetado para execução do trabalho.**

Diferentes razões de aspecto dos pinos foram estudadas, sendo estas, definidas através dos cálculos de modelamento mecânico da resistência dos mesmos. Estes valores de resistência também foram correlacionados com as pressões internas geradas pelo fluxo de material na cavidade. As tensões máximas permitidas foram calculadas pelas tradicionais formulas de acordo com [45], enquanto a tensão induzida pelo preenchimento foi estimada por simulação através do Moldflow ® . As dimensões da cavidade e do pino interno do molde são apresentadas na tabela 1.

Posteriormente, os moldes foram fabricados para análise dimensional e de desempenho após os ciclos de injeção. A fabricação foi realizada sobre uma máquina de SL Viper Si (3D System) usando a resina epóxi SI 40 fornecida pela Accura S/A. Os parâmetros do processo de fabricação empregados foram baseados nas informações postadas pelo fabricante da resina [46]. Após a fabricação os moldes foram pós-curados a temperatura de 120°C por 1 hora.

Tabela 1: Dimensões das cavidades para avaliação dos moldes.

Ø Cavidade [mm]	Espessura da Cavidade [mm]	Pino		Razão Aspecto Ød / Altura
		Ød do pino [mm]	Altura do pino [mm]	
10	0,5	0,5	1	0,5
10	0,5	1	1	1
10	0,5	2	1	2
10	0,5	2	1,5	1,33
10	0,5	2	2,5	0,8

### Análise Estrutural

A máxima tensão sobre o pino foi calculada usando um fator de segurança igual a 1 e considerando o fluxo de material perpendicular ao pino.

No modelo clássico, o comportamento do pino é considerado similar a uma barra engatada (*cantilever*), com carregamento constante devido ao enchimento da cavidade [39] como ilustrado na figura 16.

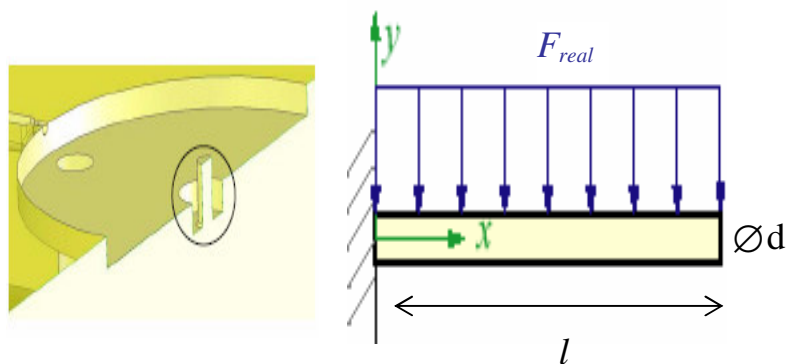


Figura 16 - Pino localizado no centro da cavidade, e perfil de carregamento em função da posição do canal de injeção.

Baseado nas condições definidas na figura 16, o calculo da força do pino é realizado pela equação 4:

$$F_{barra} = F_{real} \times l = P_{real} \times \varnothing d \times l \quad Eq. 4$$

Para calcular a tensão inicial, foi necessário determinar o máximo momento causado pelo carregamento. A equação 5 foi usada para calcular o momento em uma posição específica.

$$M_{max} = \frac{F_{barra} \times l}{2} \quad Eq. 5$$

A máxima tensão foi calculada de acordo com a equação 6.

$$\sigma_{max} = \frac{M_{max}}{W} = \frac{10 \times M_{max}}{\varnothing d^3} =$$

$$\sigma_{max} = \frac{10 \times l^2}{2 \times \varnothing d^2} \times P_{real} \quad Eq. 6$$

Onde:  $F_{barra}$  (linha de força na barra),  $F_{real}$  (força real),  $P_{real}$  (pressão real),  $\varnothing d$  (diâmetro do pino),  $l$  (comprimento do pino),  $E$  (módulo de elasticidade) e  $W$  (momento da secção). A resina epóxi SI 40 possui uma resistência ( $\sigma_{max}$ ) de 74MPa [46].

### ***Análise de Preenchimento do molde***

Através da simulação usando o Moldflow Plastic Insight (MPI) foi realizada a avaliação do tempo de preenchimento e perfil de pressão durante o preenchimento da cavidade no molde. A malha empregada foi do tipo triangular. O material simulado foi o POM Hostaform C27021 fornecido pela Targor Company. A temperatura do molde foi de 50 °C e a temperatura de fusão do material de 230 °C. A máquina injetora selecionada foi Allrounder 220S 17 tons (15mm), fabricada pela Arburg Company. O modo de análise de preenchimento foi o utilizado, devido o tempo restrito necessário para preenchimento das micro-cavidades.

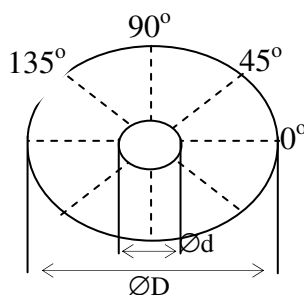
### ***Desempenho do Molde***

O desempenho dos moldes foi avaliado pelo número de ciclos de injeção até a origem de uma falha que caracterizasse a geometria original da micro-peça. As peças foram injetadas em uma Arburg 220S 150-30. O material usado para avaliação foi Hostaform POM C 27021 NT. Os parâmetros de injeção usados foram ajustados durante os primeiros ciclos de injeção, buscando a máxima qualidade avaliada visualmente.

### *Análise dimensional de peças fabricadas diretamente*

A análise dimensional foi conduzida somente sobre micro-peças fabricadas diretamente na máquina SI Viper com a resina epóxi SI 40, devido à pequena quantidade de micro-peças produzidas indiretamente usando moldes SL. As dimensões foram medidas por um estéreo microscópio conectado ao software Image Pro-Plus version 4.5.0.19.

As medidas foram obtidas de quatro diferentes posições ( $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  e  $135^\circ$ ) de ambos os diâmetros presentes nas peças. Uma ilustração das posições medidas é apresentada na figura 17. Os resultados medidos foram correlacionados com a norma NBR ISO 2768-1 [47] permitindo classificar o processo de SL de acordo com a qualidade de trabalho nestes padrões.



**Figura 17 – Vista Superficial das posições definidas para avaliação dimensional.**

## CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Investigação das propriedades mecânicas de resinas de estereolitografia visando a sua aplicação em molde para injeção de peças poliméricas miniaturizadas.

As curvas obtidas através do ensaio de tensão-deformação para a resina epóxi Vantico SL5260 em função do tempo exposto a radiação ultravioleta (UV) são apresentadas na figura 18.

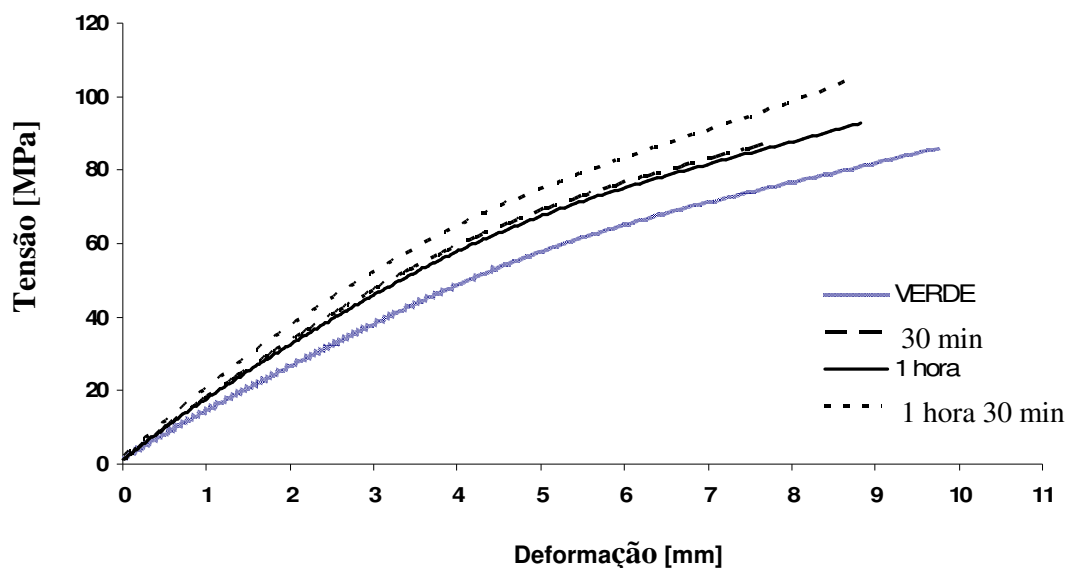


Figura 18 – Curvas de tensão vs. deformação para a resina epóxi Vantico SL5260 a verde e em diferentes condições de pós-cura.

Os resultados indicaram uma variação significativa no módulo de elasticidade dos corpos de prova tratados e o da resina no estado não-curado (a verde) como mostra a tabela 2. Corpos de prova sem pós-cura apresentam valor médio de módulo de elasticidade de 1200 MPa e corpos de prova pós-curados 1 h e 30 min apresentaram valor médio de 1700 MPa. Estes valores sugerem que quanto maior o tempo de exposição da resina epóxi Vantico SL5260 sobre a radiação UV, maior o grau de cura gerado no material, visto o módulo de

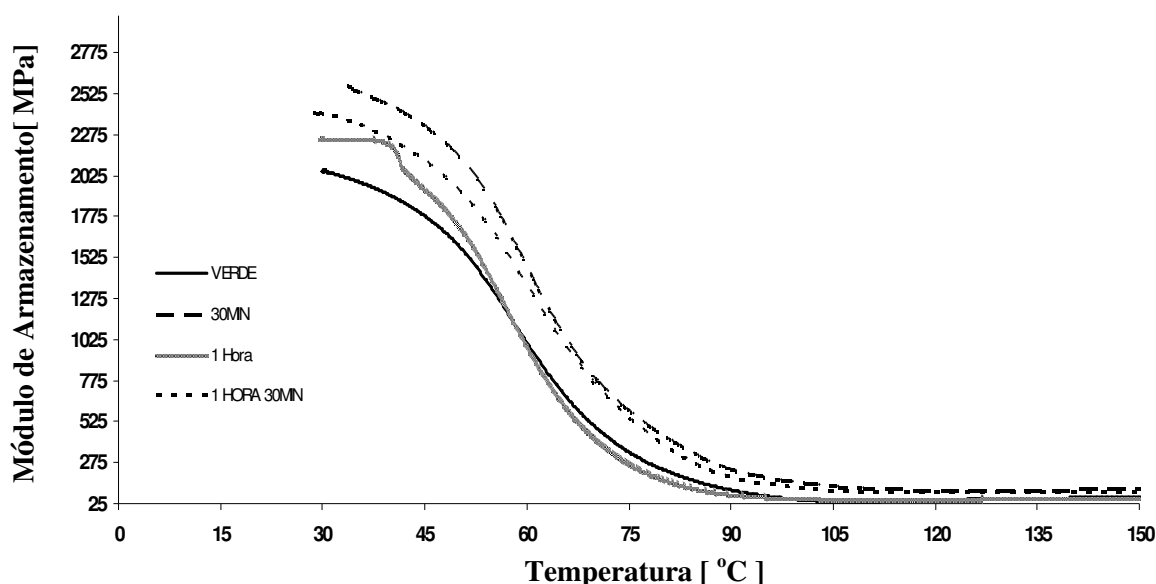


elasticidade ser uma propriedade diretamente relacionada com o número de ligações cruzadas, neste caso com o grau de cura do material. Nestas condições de ensaio não ocorreu a fratura dos corpos de prova.

**Tabela 2: Valores médios de módulos de elasticidade para corpos de prova da resina epóxi Vantico SL5260.**

Corpo de prova	Módulo de Elasticidade [MPa]
A verde	1200 ± 70
Pós-curado 30 minutos	1400 ± 90
Pós-curado 1 hora	1450 ± 60
Pós-curado 1 h e 30 min.	1700 ± 40

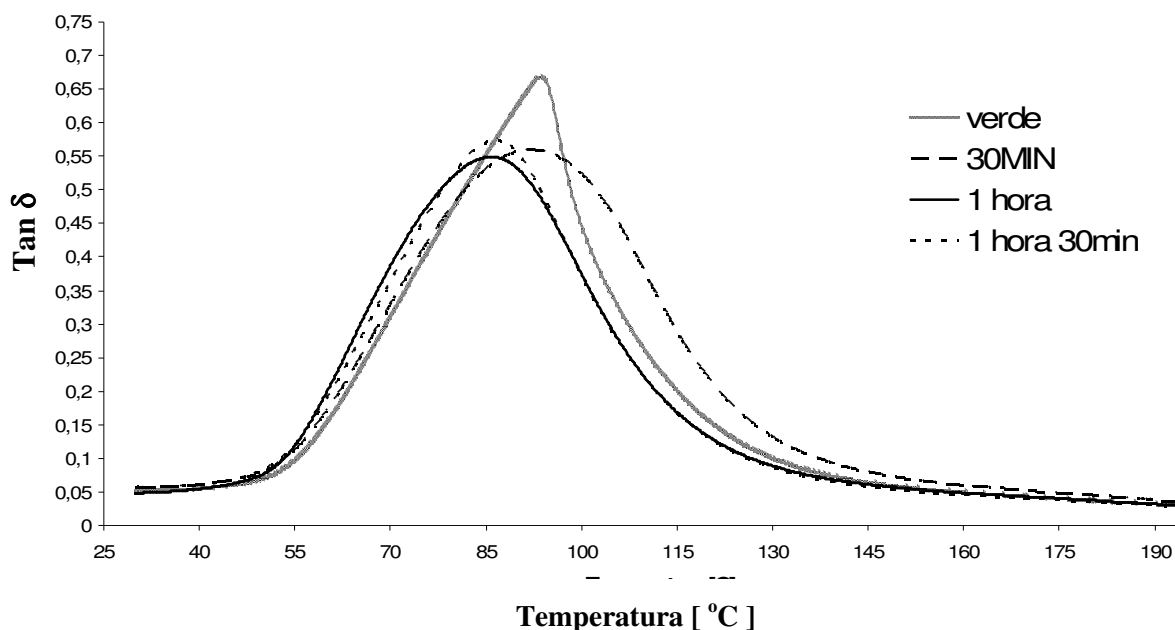
Nas figuras 19 e 20 são apresentadas as curvas dos ensaios de determinação do módulo de armazenamento ( $E'$ ) e do fator de perda ( $\tan \delta = E''/E'$ ). O comportamento do módulo de armazenamento apresentou resultados similares ao ensaio de tensão vs. deformação, i.e. os corpos de prova que permaneceram maior tempo sob pós-cura de radiação UV mostravam maiores valores de módulo de armazenamento.



**Figura 19 - Módulo de armazenamento vs temperatura para corpos de prova da resina epóxi Vantico SL5260.**

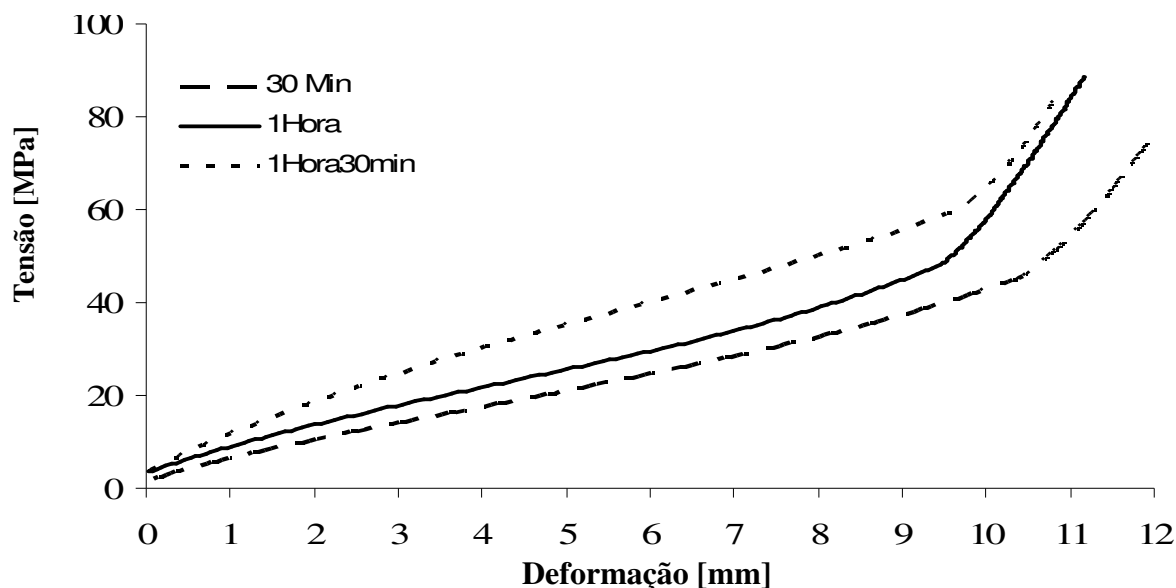
O comportamento do fator de perda  $\tan \delta$ , que é definido como a razão entre o módulo de perda e o módulo de armazenamento ( $\tan \delta = E''/E'$ ), pode revelar a temperatura de onde o módulo de armazenamento diminui de valor em relação ao módulo de perda que esta relacionada com a transição vítrea do material. Na temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ), o valor de  $\tan \delta$  é máximo e o material começa a diminuir sua característica elástica e apresentar maior característica visco-dissipativa.

Os valores máximos na curva de  $\tan \delta$  para os corpos de prova da resina epóxi Vantico SL5260 ficaram na faixa de temperatura entre 86 a 94 °C, estando à curva no estado verde com o pico de maior temperatura de 94 °C, devido provavelmente a complexa relação do comportamento do fator de perdas  $\tan \delta$  em função do comportamento de duas variáveis  $E'$  e  $E''$ , a parte elástica e a parte viscosa do módulo complexo  $E^*$  ( $E^* = E' - iE''$ ). A intensidade dos picos indica uma maior dissipação de energia para a curva do corpo de prova no estado a verde, evidenciando uma maior característica visco-dissipativa para o mesmo. Para os outros tratamentos, os valores de  $\tan \delta$  foram bastante similares.



**Figura 20 - Fator de perda ( $\tan \delta = E''/E'$ ) vs temperatura para corpos de prova da resina epóxi Vantico SL5260.**

As curvas obtidas através do ensaio de tensão-deformação para a resina epóxi SI 40 fornecida pela Accura S/A em função do tempo exposto a radiação ultravioleta (UV) são apresentadas na figura 21.



**Figura 21 – Curvas de tensão vs. deformação para a resina epóxi SI 40 em diferentes condições de pós-cura.**

Os resultados indicaram uma variação significativa no módulo de elasticidade dos corpos de prova tratados como mostra a tabela 3. Corpos de prova pós-curados 30 min apresentam valor médio de módulo de elasticidade de 250 MPa e corpos de prova pós-curados 1 h e 30 min apresentam valor médio de 500 MPa. Estes valores também sugerem que quanto maior o tempo de exposição da resina epóxi SI 40 sobre a radiação UV, maior o grau de cura gerado no material. Nestas condições de ensaio não ocorreu a fratura dos corpos de prova.

**Tabela 3: Valores médios de módulos de elasticidade para corpos de prova da resina epóxi SI 40.**

Corpo de prova	Módulo de Elasticidade [MPa]
Pós-curado 30 min.	250 ± 30
Pós-curado 1 hora	430 ± 50
Pós-curado 1 h e 30 min.	500 ± 10

Nas figuras 22 e 23 são apresentadas as curvas dos ensaios de determinação do módulo de armazenamento ( $E'$ ) e do fator de perda ( $\tan \delta = E'/E''$ ) para a resina epóxi SI 40. O comportamento do módulo de armazenamento dos corpos de provas pós-curados em diferentes condições apresentou resultados similares, uma diminuição brusca nos valores a partir de 30 °C, o que pode ser um fator limitante para uso desta resina como material de molde para injeção.

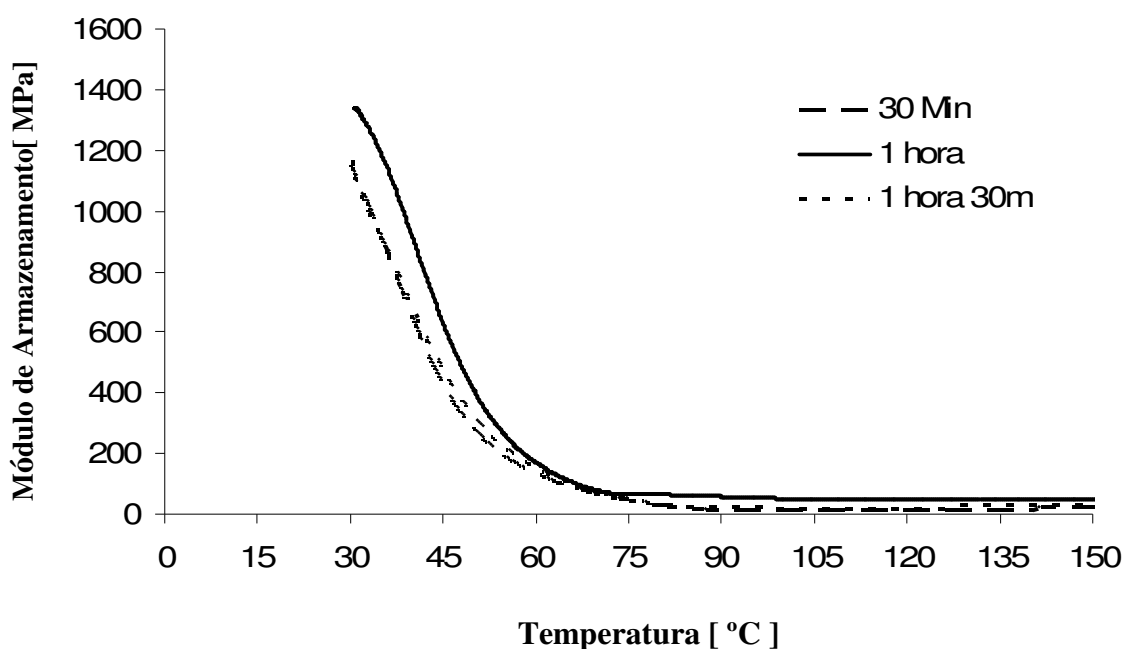


Figura 22 - Módulo de armazenamento vs temperatura para corpos de prova da resina epóxi SI 40.

Os valores máximos na curva de  $\tan \delta$  para os corpos de prova da resina epóxi SI 40 ficaram na faixa de temperatura entre 40 a 100 °C. Todos os corpos de prova apresentaram picos duplicados (dubletes) de valor máximo de  $\tan \delta$  o que pode estar relacionado com mais de um processo ou mecanismo de cura (iônico e radicalar) normalmente encontrado em resinas para estereolitografia [48].

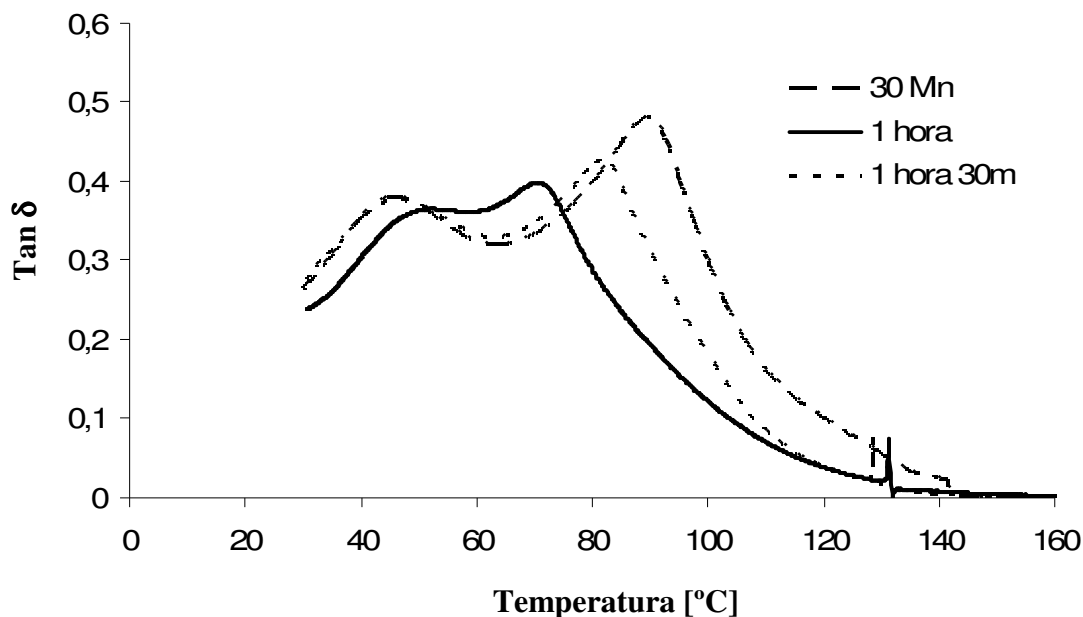


Figura 23 - Fator de perda ( $\tan \delta = E''/E'$ ) vs temperatura para corpos de prova da resina epóxi SI 40.

#### 4.2 Determinação da exatidão e da precisão dimensional de peças miniaturizadas fabricadas diretamente e indiretamente por estereolitografia na máquina SL 250/30A.

Um total de oito placas foram produzidas pelo processo de fabricação direta na máquina de estereolitografia SLA 250/30A, quatro placas com furos e quatro com pinos. A Figura 24 apresenta pinos depois de sua separação e também a placa com furos.

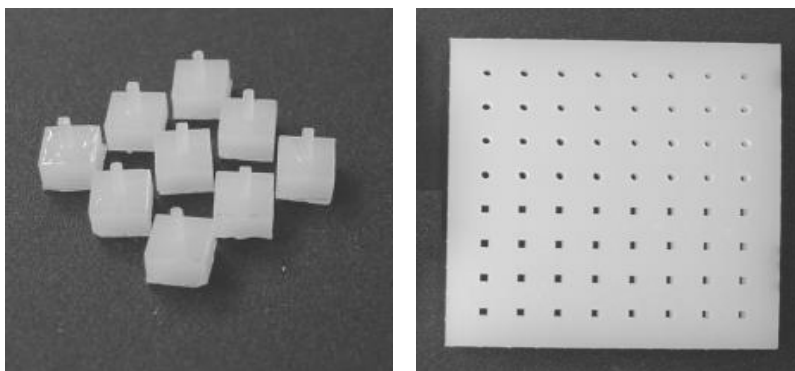


Figura 24 – Pinos separados e placa com furos fabricados diretamente

As medições das dimensões dos furos são apresentadas na tabela 4. As avaliações das placas com geometria quadrática apresentaram uma exatidão nas arestas (equação 4) de 96,81 % a 97,94 % com uma faixa de precisão (equação 5) de 97,57 % a 98,84 %, enquanto a exatidão das diagonais uma faixa de 99,26 % a 99,96 % com uma faixa de precisão de 97,84% a 99,01%. A avaliação dimensional para a geometria circular a faixa de exatidão foi de 97,18 % a 99,90 % com uma faixa de precisão de 97,55 % a 98,20 %.

**Tabela 4 – Valores dimensionais obtidos das placas com furos.**

		<b>Quadrados</b>		<b>Circular</b>
		<b>Arestas</b>	<b>Diagonais</b>	<b>Diâmetro</b>
<b>Placa 1</b>	<b>Média [mm]</b>	1.030	1.389	1.021
	<b>Desvio Padrão</b>	0.025	0.030	0.025
<b>Placa 2</b>	<b>Média [mm]</b>	1.023	1.390	1.029
	<b>Desvio Padrão</b>	0.015	0.028	0.022
<b>Placa 3</b>	<b>Média [mm]</b>	1.033	1.409	1.023
	<b>Desvio Padrão</b>	0.012	0.014	0.020
<b>Placa 4</b>	<b>Média [mm]</b>	1.021	1.389	1.001
	<b>Desvio Padrão</b>	0.017	0.019	0.018

As medições feitas nas placas com pinos são apresentadas na tabela 5. As medições sobre as arestas dos pinos apresentaram uma faixa de 97,18 % a 99,40 % com faixa de precisão de 97,28 % a 98,11 %. Para o diâmetro, a avaliação individual apresentou uma faixa de exatidão de 97,75 % a 99,26 % com uma faixa de precisão de 97,77 % a 98,97 %.

**Tabela 5 – Avaliação dimensional nos pinos.**

		<b>Arestas dos quadrados</b>	<b>Diâmetro</b>
<b>Placa 1</b>	<b>Média [mm]</b>	1.029	0.985
	<b>Desvio Padrão</b>	0.028	0.022
<b>Placa 2</b>	<b>Média [mm]</b>	1.007	0.954
	<b>Desvio Padrão</b>	0.024	0.011
<b>Placa 3</b>	<b>Média [mm]</b>	1.006	0.967
	<b>Desvio Padrão</b>	0.019	0.012
<b>Placa 4</b>	<b>Média [mm]</b>	1.025	0.973
	<b>Desvio Padrão</b>	0.020	0.010

A exatidão alcançou um significativo nível com um desvio menor que 33  $\mu\text{m}$  (0,033mm) para geometria quadrática e 46  $\mu\text{m}$  (0,046mm) para geometria circular. O processo também demonstrou um alto nível de precisão, com 68% das avaliações apresentando exatidão acima dos 97%.

Por outro lado, a tolerância dimensional medida nas placas com pinos foram de 11  $\mu\text{m}$  (0,011 mm) para arestas e 15  $\mu\text{m}$  (0,015 mm) para as diagonais no quadrado e 6  $\mu\text{m}$  (0,006 mm) para geometria circular. Nas placas com furos estas foram 8  $\mu\text{m}$  (0,008 mm) para os quadrados e 11  $\mu\text{m}$  (0,011 mm) para geometria circular. De acordo com NBR ISO 2768-1, estas tolerâncias são classificadas entre IT 7 e IT 9 para dimensões fabricadas. Os resultados demonstraram significativo potencial de aplicação a fabricação de pequenas peças.

### *Fabricação Indireta*

Durante a fase de fabricação nove ciclos de injeção foram conduzidos para cada inserto usando os materiais POM e ABS. A produção nos insertos foi alternada. Os parâmetros de injeção usados são apresentados na tabela 6 e foram ajustados durante os primeiros ciclos de injeção.

**Tabela 6 – Parâmetros de processo usados durante o processo de injeção**

<b>Parâmetros</b>	<b>POM</b>	<b>ABS</b>
<b>Temperatura do Cilindro [°C]</b>	195	240
<b>Velocidade de Injeção [mm/s]</b>	90	110
<b>Pressão de Injeção [bar]</b>	200	300
<b>Tempo de Resfriamento antes da Ejeção [s]</b>	20	25

A tabela 7 apresenta a avaliação dos resultados das peças produzidas por moldes SL. Avaliações individuais nas pequenas peças produzidas com POM apresentaram uma exatidão

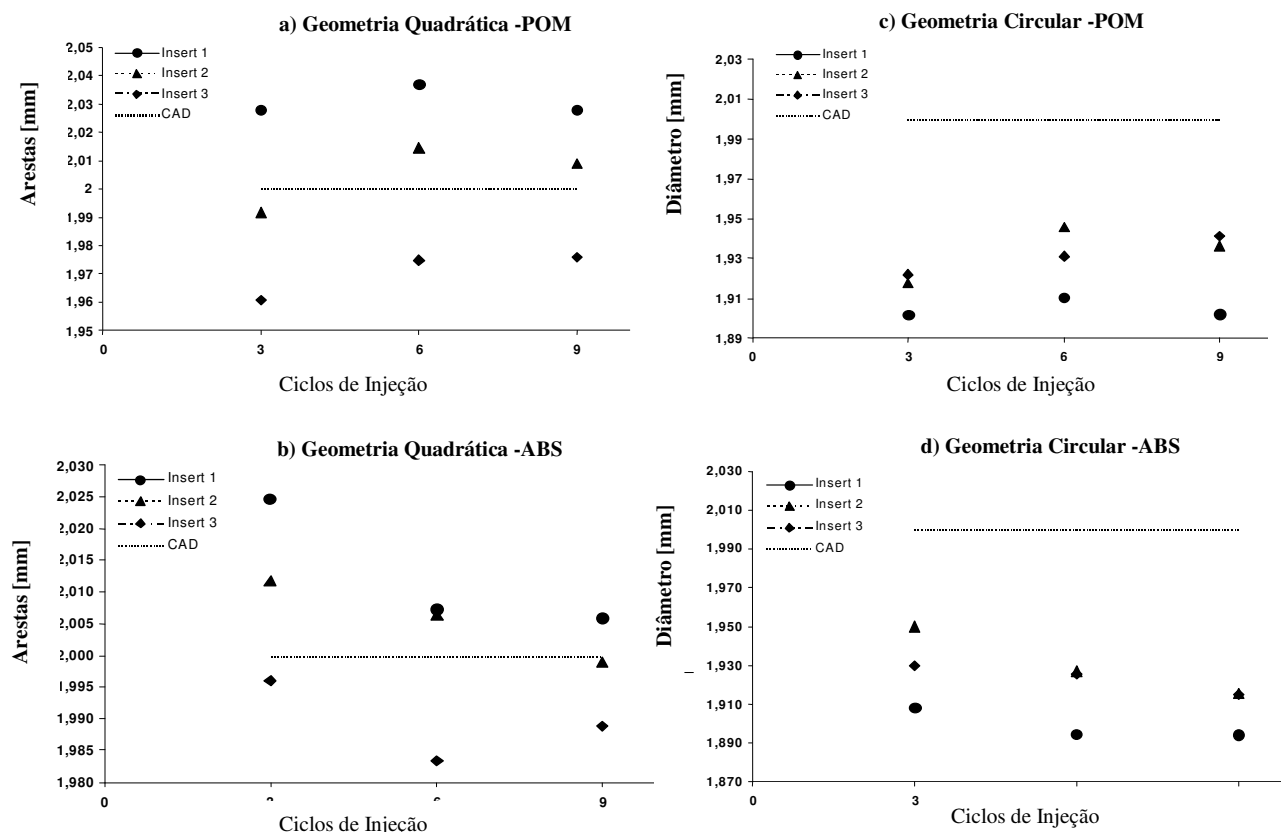
Tabela 7 - Valores medidos no molde de SL.

Insertos		POM		ABS	
		Arestas do quadrado	Diâmetro do círculo	Arestas do quadrado	Diâmetro do círculo
Inserto1	Média [mm]	2.030	1.902	2.012	1.899
	Desvio Padrão	0.025	0.053	0.025	0.037
Inserto2	Média [mm]	2.005	1.933	2.004	1.929
	Desvio Padrão	0.042	0.047	0.031	0.033
Inserto3	Média [mm]	1.971	1.931	1.989	1.922
	Desvio Padrão	0.031	0.038	0.024	0.04

entre 99,26 % a 99,88 % com uma precisão de 97,91 % a 98,77 % para geometria quadrada. Uma exatidão de 97,61 % a 98,35 % com uma precisão na faixa de 97,21 % a 98,03 % para forma circular. Para micro-peças produzidas com ABS a exatidão ficou entre 99,70 % a 99,90 % com faixa de precisão entre 98,45 % a 98,79 % para geometria quadrática. A exatidão de 97,54 % a 98,26% com precisão entre 97,92 % a 98,29 % para geometria circular. A geometria quadrática alcançou maior exatidão e precisão que geometria circular, a qual pode estar relacionada com as limitações da fabricação de micro-peças em moldes fabricados por SL.

A exatidão medida durante o processo indireto apresentou tendências positivas e negativas, no entanto, com menor precisão quando comparadas com o processo de fabricação direta. Pesquisas anteriores demonstraram que temperatura do molde, pressão de injeção, pressão de recalque e contração são fatores de influencia direta [9-10,19]. A figura 25 apresenta as dimensões de micro-peças como função dos ciclos de injeção. As dimensões das micro-peças produzidas com POM e ABS, mesmo apresentando oscilações, não foram afetadas pelos ciclos de injeção. A tabela 8 apresenta a análise estatística ANOVA, para um valor de  $\alpha = 0,05$ . Conforme verificado na tabela 8, o valor de p foi maior que 0,05, confirmando que os valores dimensionais não apresentam variações em função do ciclo de injeção [49].





**Figura 25 - Dimensões das arestas (b e d) e diâmetros (a e c) para geometria quadrática e circular como função dos ciclos de injeção.**

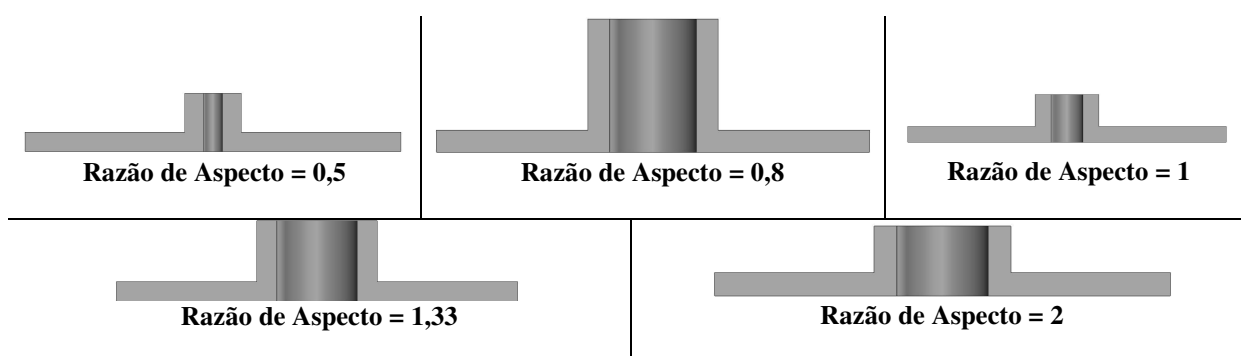
A tolerância dimensional medida para POM foi de 17  $\mu\text{m}$  (0,017 mm) para quadrado e 15  $\mu\text{m}$  (0,015 mm) para geometria circular. Para o ABS, estes valores foram 7,6  $\mu\text{m}$  (0,0076 mm) para quadrado e 7  $\mu\text{m}$  (0,007) para geometria circular. De acordo com ISO 286-2 (1988), a faixa de tolerância dimensional está classificada entre IT 7 - IT 8 para o POM e IT 6 – IT 7 para o ABS. Estes valores indicam que o processo de fabricação rápida, nas condições empregadas, está propício a produzir pequenas peças com dimensões de 2,0 mm.

**Tabela 8 – Análise estatística ANOVA para um valor de  $\alpha = 0,05$**

ANOVA					
	SQ	gl	QM	Razao f	Valor-p
Trat	0,0023	2	0,0011	2,41	0,3220
Erro	0,0028	6	0,0005		
Total	0,0040	8			

#### ***4.3 Determinação da exatidão e a precisão dimensional de peças miniaturizadas e análise do desempenho dos moldes fabricados na máquina SI Viper 2.***

Para o estudo de exatidão e precisão dimensional de peças miniaturizadas produzidas na máquina SI Viper 2 foram projetadas e fabricadas peças com geometria de disco com cilindro concêntrico (pino), onde este cilindro (pino) apresenta diferentes relações entre diâmetro ( $d$ ) e altura ( $h$ ). A razão entre o diâmetro do pino e sua altura é definida como razão de aspecto. Foram fabricadas peças com diferentes razões de aspecto como ilustra a figura 26.



**Figura 26 - Peças com diferentes razões de aspecto fabricadas diretamente por estereolitografia na máquina SI Viper 2.**

Os valores médios e desvio padrão do diâmetro externo das peças ( $D$ ) e dos diâmetros dos pinos ( $d$ ) são apresentados na tabela 9.

Os resultados encontrados foram menores do que o diâmetro projetado para fabricação em sistema CAD de 10,00 mm para ( $D$ ) e 0,50 a 2,00 mm para ( $d$ ). Esta característica está diretamente relacionada com as variações do processo causadas pela contração da resina epóxi durante a fabricação da peças.

Os valores médios do diâmetro ( $D$ ) das peças fabricadas diretamente na máquina SI Viper 2 apresentaram uma exatidão de 99,0 a 99,6 % com uma faixa de precisão de 99,5 % a 99,9 % em relação aos diâmetros projetados em CAD de 10 mm.

**Tabela 9 - Valores médios e desvio padrão das dimensões do diâmetro externo (D) e do diâmetro do pino (d) das peças fabricadas diretamente por estereolitografia.**

Peças miniaturizadas com razão de aspecto (R.A) especificadas		Média [mm]	Desvio- Padrão
<b>R.A</b> <b>0,50</b>	<b>ØD [10 mm]</b>	9,80	0,043
	<b>Ød [0.5 mm]</b>	0,50	0,025
<b>R.A</b> <b>0,80</b>	<b>ØD [10 mm]</b>	9,92	0,034
	<b>Ød [2 mm]</b>	1,94	0,060
<b>R.A</b> <b>1,00</b>	<b>ØD [10mm]</b>	9,9	0,035
	<b>Ød [1 mm]</b>	1,02	0,036
<b>R.A</b> <b>1,33</b>	<b>ØD [10mm]</b>	9,88	0,037
	<b>Ød [2 mm ]</b>	2,02	0,043
<b>R.A</b> <b>2</b>	<b>ØD [10mm]</b>	9,88	0,035
	<b>Ød [2 mm ]</b>	2,03	0,038

Os valores médios do diâmetro dos pinos (d) das peças fabricadas diretamente na máquina SI Viper 2, apresentaram exatidão de 97,0 a 100 % com uma faixa de precisão de 96,0 % a 99,5 %.

Para o diâmetro (D) de 10 mm a tolerância dimensional foi na faixa de 70  $\mu\text{m}$  (0,070 mm), sendo classificada como IT11 de acordo com a ISO 286. Para os diâmetros dos pinos (d) as tolerâncias foram em média de 50  $\mu\text{m}$  (0,050 mm) para 0.5mm, 72  $\mu\text{m}$  (0,072 mm) para 1mm e 23  $\mu\text{m}$  (0,023 mm) para 2 mm. A qualidade de trabalho para as dimensões 0,5 mm e 1mm ficaram acima da IT12, enquanto para a dimensão de 2mm em IT9. De acordo com a NBR ISO 2768-1 esta técnica é adequada para a fabricação de pequenas peças nas condições desenvolvidas.

Para realização de estudos sobre a fabricação indireta de peças miniaturizadas utilizando os moldes de SL fabricados na máquina SI Viper 2 foi inicialmente realizada a análise mecânica estrutural dos moldes SL. Usando fator de segurança igual a 1 e considerando a posição do canal de injeção foram calculadas pelas equações 4 e 5 (parte experimental) a

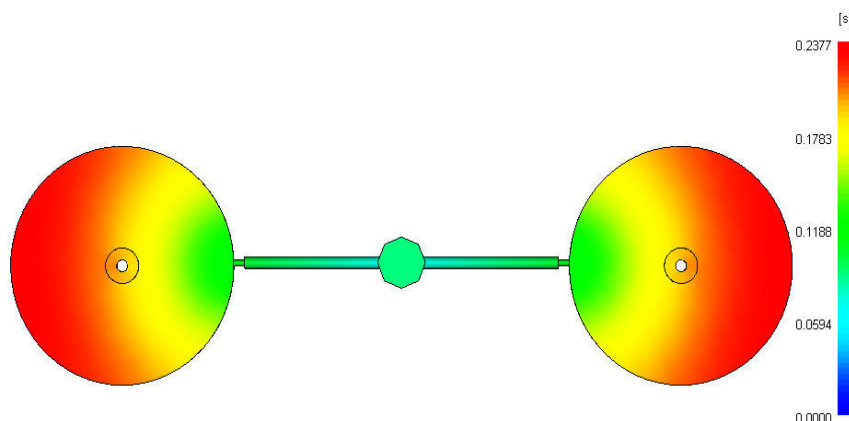
tensão máxima sobre o pino e pressão máxima sobre as paredes do molde. O material usado foi a resina epóxi SI 40, que possui um resistência a ruptura de 74 MPa e módulo de elasticidade de 3150 MPa.

Estes resultados são apresentados na tabela 10. Em todos os casos de esforços em flexão, a máxima distancia do eixo neutro (fronteira entre esforços de tração e compressão) foi usada para calcular o ponto máximo de tensão.

**Tabela 10 - Valores calculados para as tensões máximas permitidas nas regiões do pino e parede do molde.**

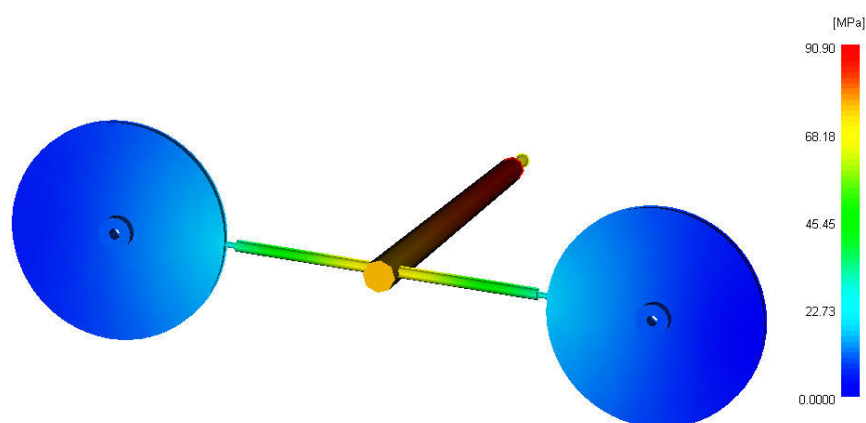
	Razão de Aspecto				
	0,5	0,8	1,0	1,33	2
<b>P</b> máxima no pino [MPa]	3,75	9,60	15,0	26,6	60,0
<b>P</b> máxima na parede [MPa]	37	37	37	37	37

Com os resultados, é possível concluir que os pinos com razões de aspecto menores do que 1,33 irão falhar antes que parede do molde. No entanto, com o aumento da razão de aspecto do pino, a parede passa torna-se a parte mais sensível mecanicamente.



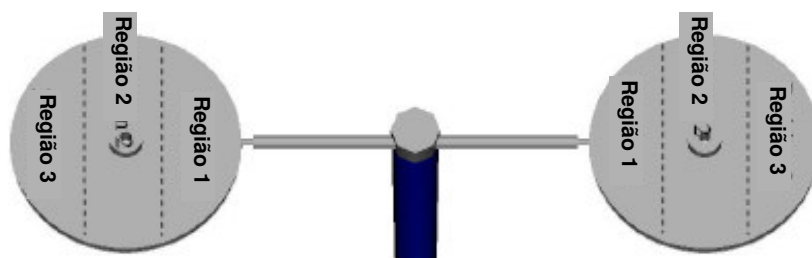
**Figure 27 - Figura ilustrando o preenchimento do molde SL e indicando o tempo de preenchimento da cavidade. Simulação usando o sistema CAE MoldFlow.**

Posteriormente foi simulada computacionalmente o processo de preenchimento do molde SL na temperatura do molde de 35 °C em uma máquina injetora Allrounder 220 S 17 tons 0.5 oz (15mm). O material usado para simulação foi POM Hostaform C27021 com temperatura de fusão de 230 °C. O tempo de enchimento necessário para o completo enchimento das micro peças foi de 0,477 segundos, como ilustrado na figura 27. Uma característica verificada foi que a partir da metade da cavidade, o tempo de enchimento foi pequeno.



**Figure 28 - Figura ilustrando o perfil de pressão durante preenchimento do molde. Simulação usando o sistema CAE MoldFlow.**

O perfil de pressão foi também determinado por simulação. A máxima pressão foi 90 MPa localizada no ponto de injeção como ilustra a figura 28. A simulação mostra também que todo o sistema de alimentação apresenta elevados níveis de pressão (Figura 29). No interior da cavidade a faixa de pressão foi de 14,7 a 2 MPa. A figura 28 define três regiões na cavidade do molde (na peça) que apresentam valores diferenciados de pressão (tabela 11), permitindo uma análise de maneira mais detalhada o perfil de valores de pressão dentro da cavidade do molde durante o preenchimento.



**Figura 29 - Regiões definidas para a avaliação da pressão durante preenchimento da peça.**

**Tabela 11 – Valores de pressão nas regiões 1, 2 e 3 em função do tempo no preenchimento.**

<b>Tempo [s]</b>	<b>Pressão na região 1 [MPa]</b>	<b>Pressão na região 2 [MPa]</b>	<b>Pressão na região 3 [MPa]</b>
0,16	0,80	0,00	0,00
0,20	5,75	0,42	0,00
0,23	14,07	4,69	2,00

Os valores de pressão obtidos na simulação do preenchimento do molde SL foram inferiores aos valores calculados de pressão máxima que as paredes do molde suportariam, indicando que o molde resistiria ao processo de moldagem por injeção das peças projetadas.

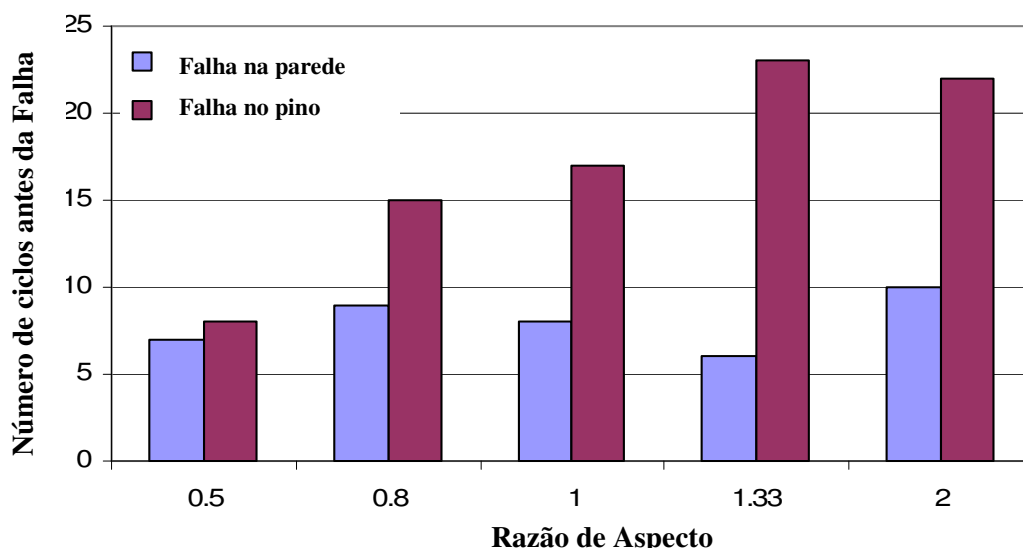
Na realização dos experimentos de moldagem por injeção, os parâmetros de processos (tabela 12) foram ajustados nos primeiros ciclos.

**Tabela 12 - Parâmetros usados na moldagem por injeção em molde SL.**

<b>Parâmetros</b>	<b>Valores</b>
Temperatura do fuso	230 °C
Velocidade de injeção	18 cm <sup>3</sup> /s
Pressão de injeção	55 MPa
Tempo de resfriamento antes da injeção	10 s
Temperatura do molde	35 °C
Velocidade de injeção	4 mm/s

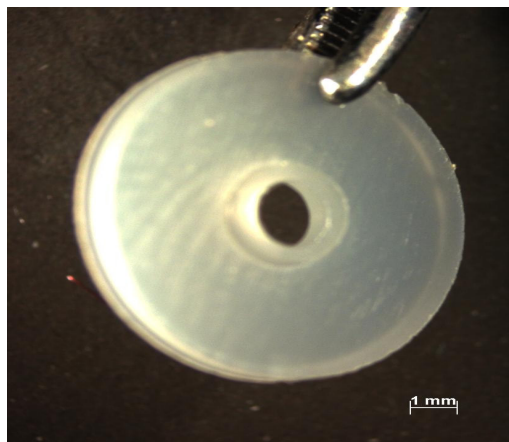
Os valores necessários para a realização dos experimentos foram por volta de 45% inferiores aos valores simulados, demonstrando limitações na simulação de moldagem por injeção de pequenas peças em moldes SL.

O desempenho do molde SL foi avaliado com base no número de peças fabricadas sem alteração nenhuma alteração dimensional do projeto estabelecido (tabela 1). A figura 30 mostra o número de ciclos de injeção a que resistiu cada molde de peça com diferentes razões de aspecto. As falhas por geração de rebarba e por quebra dos pinos são também indicadas na figura 30. A quantidade de peças produzidas foi reduzida devido a falhas prematuras na cavidade dos moldes SL, provavelmente causadas pela pressão gerada pelo fluxo de material durante o preenchimento das cavidades.



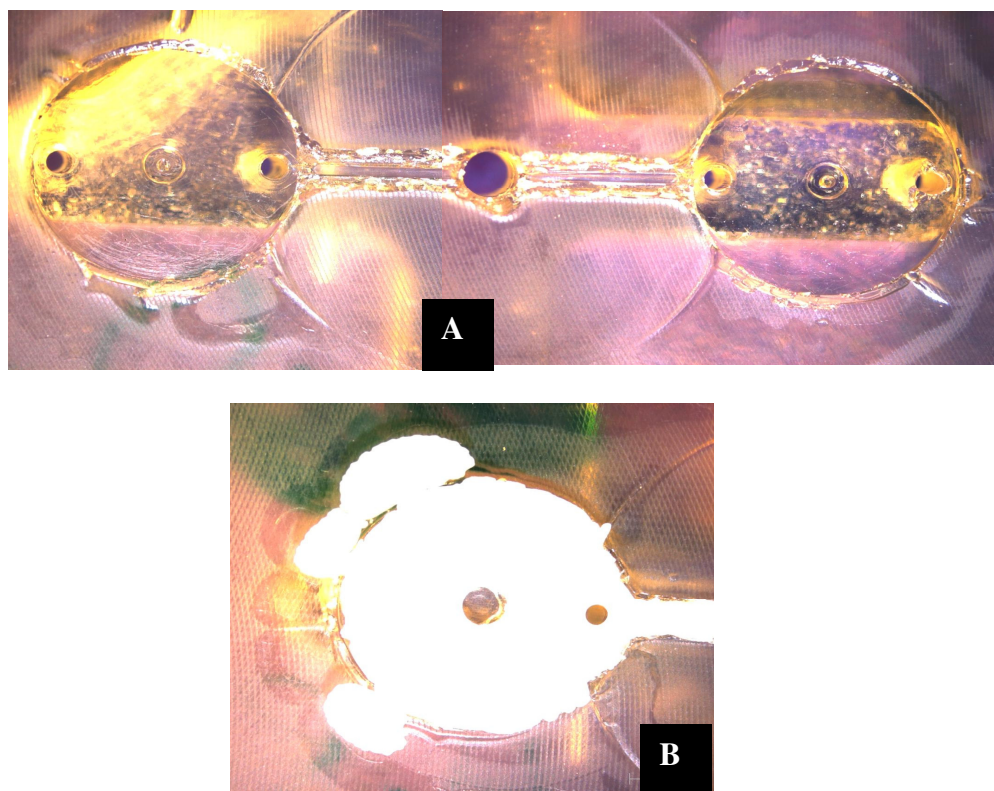
**Figura 30 - Número de ciclos realizados antes do surgimento da primeira falha por existência de rebarba e por quebra de pino.**

A figura 31 apresenta uma peça injetada em um molde de estereolitografia fabricado pela máquina SI Viper 2. De acordo com a figura 32, é possível verificar que as falhas por excesso de material (rebarba) ocorrem entre 5 e 10 peças injetadas. As falhas por quebra de pino ocorrem após diferentes quantidades de ciclos dependendo da razão de aspecto do pino (robustez) e ficam entre 7 e 23 peças.



**Figure 32 – Imagem da peça fabricada por injeção em molde SL.**

Os resultados concordam com os da análise mecânica estrutural previamente realizada onde a resistência dos pinos aumenta proporcionalmente com o tamanho da razão de aspecto. No entanto, a falha prematura da parede da cavidade antes da falha do pino contradiz a análise estrutural.



**Figura 32 - Imagens mostrando as falhas na parede das cavidade (A) e peça com rebarba na cavidade (B) do molde SL.**



Particularidades do processo de fabricação por estereolitografia como fabricação em camadas com regiões com grau de cura variado (heterogeneidades na cura) e principalmente ao comportamento termomecânico da resina SI 40 a qual diminui muito suas propriedades mecânicas com o aumento da temperatura [11,13].

A figura 32 apresenta imagens das falhas ocorridas nas cavidades, mostrando detalhes na borda da cavidade que induzem a formação de rebarbas nas peças moldadas. Nestas figuras é possível observar o lascamento das paredes da cavidade. Esta característica demonstra a baixa resistência da resina SI 40 para uso em moldes para injeção como indicado nos estudos de comportamento mecânico desta resina.

## **CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES**

- A resina Vantico SL5260 apresentou módulo de elasticidade mais elevado que a resina SI 40, o que a torna mais adequada para uso em moldes de estereolitografia para injeção de materiais termoplásticos.
- A máquina de estereolitografia SL 250/30A demonstrou exatidão acima dos 97% em 68% das avaliações realizadas para a fabricação direta. Na fabricação indireta os materiais POM e ABS apresentaram similaridade dimensional, indicando que materiais semi-cristalinos e amorfos não influenciam na contração de peças miniaturizadas. Estes valores correlacionados com a NBR ISO 2768-1 recomendam para as condições empregadas, o processo de fabricação rápida a produzir pequenas peças com dimensões de 2 mm.
- A máquina de estereolitografia SI Viper 2 apresentou na fabricação direta somente para a dimensão de 2 mm recomendação, de acordo com NBR ISO 2768-1, para fabricação de peças miniaturizadas.
- Pelas falhas prematuras nos moldes, se evidenciou que a resina epóxi SI 40 não é indicada para a fabricação de moldes rápidos para micro-injeção de materiais termoplásticos.
- O processo de estereolitografia através dos equipamentos SLA250/30A e SI Viper 2 demonstrou ser capaz de fabricar peças na faixa de milímetros com exatidão e precisão requeridas atualmente para aplicação industrial.

## CAPÍTULO 6 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Batalha, G.; Cerveira, R.; Silva, F.; “Simulação de processos de micro-fabricação: influência efeito de escala” [http://www.poli.usp.br/pmr/lefa/download/COF\\_041011365.pdf](http://www.poli.usp.br/pmr/lefa/download/COF_041011365.pdf)
- [2] Nexus Market Analysis for MEMS and Microsystems III 2005 – 2009. 4M Network of Excellence : An instrument for integration of European Research in Multi-Material Micro Manufacture.
- [3] Tolinski, M.; “Macro Challenges in Micromolding”, *Plastic Engineering*, 2005, pp 14-16.
- [4] Piotter, V.; Mueller, K.; Plewa, K.; Ruprecht, R.; Hausset, J. “Desempenho and simulation of thermoplastic micro injection molding”, *Microsystem Technologies*, 2004, pp. 387-390.
- [5] Frazier, B.; Friedrich, C.; Warrington, R. O.; “The Miniaturization Technologies: Past, Present, and Future”, 1994, pp 1460 – 1465.
- [6] Hecke, M.; Schomburg, W. K. “Review on micro molding of thermoplastic polymers” *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2003, pp. R1-R14.
- [7] Sha, B.; Dimov, S. S.; Pham, D. T.; Griffiths, C. A. “Study of factors affecting aspect ratios achievable in micro-injection moulding” *4M 2005 First International Conference on Multi-Material MicroManufacture Proceeding*, 2005. pp 1 – 4.
- [8] Brown, R. L. E. “Design and manufacture of plastic parts” *New york: Wiley Interscience*, 1980. 203 p
- [9] Zhou, J. G.; Herscovici, D.; Chen, C. C. “Parametric process optimization to improve the accuracy of rapid prototyped stereolithography parts” *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 1999, pp. 363 – 379.
- [10] Segal, J.I.; Campbel R. I. “A Review of research into the effects of rapid tooling on part properties” *Rapid Prototyping Journal*, 2001, pp. 90 – 98.
- [11] Cavalheiro, A. Z.; Ahrens, C. H.; SALMORIA, G.V. “Utilização de moldes fabricados por estereolitografia na moldagem por injeção de termoplásticos: Análise crítica e perspectivas futuras.” *Plástico Industrial*, Ano VIII, n. 92, p 206-221, 2006.

- 
- [12] Michaeli, W.; Ziegmann, C. “Micro assembly injection moulding for the generation of hybrid microstructures” *Microsystem Technology*, 2003 pp. 427 – 430.
- [13] Salmoria, G. V.; Gonzalez, V. J.; Ahrens, C. H.; Soldi, V.; Pires, A.T.N.; “Stereolithography somos 7110 resin: mechanical behavior and fractography of parts post-cured by different methods” *Polymer Testing*, 2005, pp. 157 – 162.
- [14] Zhou, H.; Li, D. “Integrated simulation of the injection molding process with stereolithography molds” *Journal Manufacturing Techonology*, 2006, pp. 53-60.
- [15] Cedorge, T.; Baut, Y, Palmer, A. & Colton, J. – “Design Rules for Stereolithography Injection Molding Inserts”, *Proceedings of the 8th European Conference on Rapid Prototyping and Manufacturing*, Nottingham, 1999, pp. 193 -196.
- [16] Bertsch, A.; Bernhard, P.; Vogt, C.; Renauld, P. “Rapid prototyping of small size objects” *Rapid Prototyping Journal*, 2000, pp. 259 – 266.
- [17] Rahmati, S.; Dickens, P. “Stereolithography for injection mould tooling” *Journal Manufacturing Techonology*, 1997, pp. 53-60.
- [18] Jacobs, P. F.; “Stereolithography and other RP&M Technologies”. Society of Manufacture Engineers, 1996, ASME PRESS, New York – USA.
- [19] Ribeiro Jr., A. S.; Hopkinson, N.; Ahrens, C. H. “Thermal effects on stereolithography tools during injection moulding”. *Rapid Prototyping Journal*, 2004, pp.176-180.
- [20] Huang, C.K.; Chen, S.W.; Yang, C.T. “Accuracy and Mechanical Properties of Multiparts Produced in one mold in Microinjection Molding” *Polymer Engineering and Science*, 2005, pp. 1471 – 1478.
- [21] Ruprecht, R.; Gietzelt, T.; Muller, K.; Piotter, V.; HauBelt, J. “Injection molding of microstructured components from plastics, metals and ceramic” *Microsystem Technology*, 2002 pp. 351 – 358.
- [22] Piotter, V.; Bauer, W.; Benzler, T.; Emde, A.; “Injection molding of components for microsystems” *Microsystem Technology*, 2001, pp. 99 – 102.
- [23] Ruprecht, R.; Hanemann, T.; Piotter, V.; HauBelt, J.; “Polymer materials for microsystem technologies” *Microsystem Technology*, 1998, pp. 44 – 48.

- 
- [24] Piotter, V.; Muller, K.; Plewa, K.; Ruprecht, V.; HauBelt, J. “Performance and simulation of thermoplastic micro injection molding” *Microsystem Technology*, 2002 pp. 380 – 397.
- [25] Piotter, V.; Hanemann, T.; Ruprecht, R.; HauBelt, J.; “Injection molding and related techniques for fabrication microstructures” *Microsystem Technology*, 1997, pp. 129 – 133.
- [26] Becker, H.; Gartner, C.; “Polymer microfabrication methods for microfluidic analytical applications” *Electrophoresis*, 2000, pp. 21 – 26.
- [27] Zissi, S.; Bertsch, A.; Jézéquel, J. Y.; Corbel, S.; Loughnot, D. J.; André, J. C. “Stereolithography and microtechniques” *Microsystem Technology*, 1996 pp. 97 – 102.
- [28] Ouellette, J.; “The microfabrication boom” *The Industrial Physicist*, 1996.
- [29] Jacobs, P.F.; “Rapid Prototyping & Manufacturing: Fundamentals of Stereolithography” Society of Manufacture Engineers, 1992, Michigan – USA.
- [30] Fuh, J.Y.H.; “Processing and characterizing photo-sensitive polymer in the rapid prototyping process” *Journal of Materials Processing Technology*, 1999, pp. 211-217.
- [31] Hecklele, M.; Bacher, W.; Muller, K.D.; “Hot embossing – the molding technique for plastic microstructures” *Microsystem Technology*, 1998, pp. 122 – 124.
- [32] Worgull, M.; Heckeke, M.; Schomburg, W, K.; “Large scale hot embossing” *Microsystem Technology*, 2005, pp. 110 – 115.
- [33] Rotting, O.; Ropke, W.; Becker, H.; Gartner, C.; “Polymer microfabrication technologies” *Microsystem Technology*, 2002, pp. 32 - 36.
- [34] Schiff, H.; Heyderman, L. J.; “Pattern formation in hot embossing of thin polymer films” *Institute of Physics Publishing*, 2001, pp. 173-177.
- [35] Piotter, V.; Gietzelt, T.; Merz, L.; “Micro powder-injection moulding of metals and ceramics” *Sadhana*, 2003, pp. 299 – 306.
- [36] Frick, A.; Stern, C.; Berger, W.; “Manufacturing og high quality micro prototypes by injection molding using hybrid mold techonology”, *4M 2005 First International Conference on Multi-Material MicroManufacture Proceeding*, 2005. pp 103 - 106.
- [37] Fernandes, G. A. “Resina fotopolimérica SOMOS 7110 para estereolitografia.” “Dissertação de Mestrado”. *Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais*, UFSC, Florianópolis, 2001.

- 
- [38] [www.cimject.com.br](http://www.cimject.com.br), acessada em 20/09/2008.
- [39] Gomide, R.B. “Fabricação de componentes injetados em insertos produzidos por estereolitografia”. *Dissertação de Mestrado*. Curso de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, UFSC, Florianópolis-SC, 2000.
- [40] Salmoria, G.V. “Caracterização e análise da microestrutura e das propriedades de peças fabricadas por estereolitografia”. *Monografia para Concurso de Professor Adjunto*. UFSC, Florianópolis, 2002.
- [41] Klauss, P.; Processo de cura e decomposição térmica da resina Renshape<sup>TM</sup> SL 5260 utilizada em fabricação rápida por estereolitografia; *Dissertação de Mestrado*; Curso de Pós-Graduação em Engenharia Materiais da Universidade Federal de Santa Catarina. Março de 2006.
- [42] Foggiatto, J., Aquiomar. “Utilização do processo de modelagem por fusão e deposição (FDM) na fabricação rápida de insertos para injeção de termoplásticos. *Tese (Engenharia Mecânica)* - Universidade Federal de Santa Catarina. Março, 2005.
- [43] Villamizar, F., A., Yanez. “*Moldes rápidos fabricados por vazamento de resina epoxi/alumínio*: Investigações sobre o processo de fabricação e o desempenho termomecânico durante a injeção de termoplásticos”, *Dissertação (Engenharia Mecânica)* - Universidade Federal de Santa Catarina, Dezembro 2005.
- [44] Barry, C., Boothroyd, P., Lai, F., Nunn, R.E., Orroth, S.A., Schott, N.R. “Short shot method of injection molding”, *Plastics Processing Laboratory Syllabus*, University of Massachusetts, Lowell – Plastic Engineering Department, 6<sup>th</sup> ed. pag 61, 1995.
- [45] Popov, E. P.; “Introdução à mecânica dos sólidos”, Editora Edgard Bluncher, São Paulo/SP, 1978.
- [46] 3D Systems Data Sheet. “Accura SI 40 Material for the SLA Viper”, Available from: [www.3dsystems.com](http://www.3dsystems.com)
- [47] NBR ISO 2768-1 “Tolerâncias gerais – Parte 1 – Tolerância para dimensões lineares e angulares sem indicação de tolerância individual”, Rio de Janeiro: ABNT, 2001. 5 p.
- [48] Salmoria, G. V., Ahrens, C. H., Pires, A. T. N., Fernandes, G. A., “Pós-cura garante bom dimensionamento e maior vida útil a peças fabricadas por estereolitografia”, *Plástico Industrial*, Ano VI, N° 72, pp 128-134, Editora Aranda, São Paulo, SP, Agosto, 2004.
- [49] Montgomery, D. C.; “*Design and Analysis of Experiments*”. John Wiley & Sons, 2005, USA.

## Anexo 1 – Qualidade de trabalho e Tolerância dimensional segundo NBR ISO 2768-1

		Qualidade de Trabalho																	
		IT01	IT0	IT1	IT2	IT3	IT4	IT5	IT6	IT7	IT8	IT9	IT10	IT11	IT12	IT13	IT14	IT15	IT16
Eixos	Furos	mecânica extra-precisa					mecânica corrente								mecânica grosseira				

Tolerâncias fundamentais ISO até 500 mm														
Grupo de dimensões em mm (milímetros) – valores da tabela em $\mu\text{m}$ (microns)														
qualidade	Até 1	> 1 ≤ 3	> 3 ≤ 6	> 6 ≤ 10	> 10 ≤ 18	> 18 ≤ 30	> 30 ≤ 50	> 50 ≤ 80	> 80 ≤ 120	> 120 ≤ 180	> 180 ≤ 250	> 250 ≤ 315	> 315 ≤ 400	> 400 ≤ 500
IT 01	0,3	0,3	0,4	0,4	0,5	0,6	0,6	0,8	1	1,2	2	2,5	3	4
IT 0	0,5	0,5	0,6	0,6	0,8	1	1	1,2	1,5	2	3	4	5	6
IT 1	0,8	0,8	1	1	1,2	1,5	1,5	2	2,5	3,5	4,5	6	7	8
IT 2	1,2	1,2	1,5	1,5	2	2,5	2,5	3	4	5	7	8	9	10
IT 3	2	2	2,5	2,5	3	4	4	5	6	8	10	12	13	15
IT 4	3	3	4	4	5	6	7	8	10	12	14	16	18	20
IT 5	4	4	5	6	8	9	11	13	15	18	20	23	25	27
IT 6	6	6	8	9	11	13	16	19	22	25	29	32	36	40
IT 7	10	10	12	15	18	21	25	30	35	40	46	52	57	63
IT 8	14	14	18	22	27	33	39	46	54	63	72	81	89	97
IT 9	25	25	30	36	43	52	62	74	87	100	115	130	140	155
IT 10	40	40	48	58	70	84	100	120	140	160	185	210	230	250
IT 11	60	60	75	90	110	130	160	190	220	250	290	320	360	400
IT 12	-	100	120	150	180	210	250	300	350	400	460	520	570	630
IT 13	-	140	180	220	270	330	390	460	540	630	720	810	890	970
IT 14	-	250	300	360	430	520	620	740	870	1000	1150	1300	1400	1550
IT 15	-	400	480	580	700	840	1000	1200	1400	1600	1850	2100	2300	2500
IT 16	-	600	750	900	1100	1300	1600	1900	2200	2500	2900	3200	3600	4000